



Tiago André Soares Silva

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica
e de Computadores

Construção, ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. João Miguel Murta Pina, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: Prof.^a Dr.^a Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Dr. Rui Manuel Santos Tavares, Prof. Auxiliar,
FCT-UNL

Arguentes: Prof. Dr. Mário Fernando da Silva Ventim Neves, Prof.
Auxiliar, UNL-FCT

Vogais: Prof. Dr. João Miguel Murta Pina, Prof. Auxiliar, FCT-
UNL

Prof.^a Dr.^a Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof.
Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio, 2013

Construção, ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor

Copyright © Tiago André Soares Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu futuro... e a todos aqueles que me ajudaram a construí-lo...

Agradecimentos

O presente trabalho simboliza simultaneamente o fim de uma etapa e o início de uma nova, o início do resto da minha vida. Significa muito para mim e não podia deixar de agradecer a todos os que contribuíram na conclusão deste trabalho e no atingir deste objectivo a que me propus desde tão cedo. Os agradecimentos são feitos considerando não só este trabalho em particular, mas também toda a formação adquirida e o quanto eu cresci como pessoa e como futuro profissional ao longo de todo este percurso académico.

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador, Professor Dr. João Murta Pina, e à minha co-orientadora, Professora Dr.^a Anabela Pronto, pela sua dedicação, disponibilidade e por me terem acompanhado durante esta caminhada tentando sempre torná-la o mais rectilínea possível. Agradeço ainda pela oportunidade que tive de poder trabalhar nas suas companhias enquanto monitor.

Ao Professor Mário Ventim Neves, por me ter “raptado” de uma aula para visitar uma subestação local, por ser o principal responsável pelo meu interesse na área da Energia e da Electrotecnia, por tudo o que me ensinou e pelo prazer que foi trabalhar na sua companhia enquanto monitor.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por providenciar todo o espaço e material necessário à realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho e não só, em particular ao pessoal do laboratório 1.8 do Ed. X e ao Engenheiro David Inácio, sempre com um conselho amigo e sempre pronto para ajudar a desviar pedras do nosso caminho nos primeiros contactos com o laboratório.

Porque para além do que conseguimos, as pessoas são o que levamos de importante em cada fase da nossa vida, um agradecimento especial aos meus amigos do peito, os irmãos que nunca tive. Não preciso de os nomear, eles sabem que são, sempre com sábias palavras e soluções para tudo, ainda que seja um simples “vamos fazer uma pausa e já pensas nisso”, pois realmente por vezes essa é a melhor solução.

Por fim, porque os últimos são os primeiros, um agradecimento muito especial à minha família, em particular aos meus pais, a quem devo tudo o que sou, o que tenho e o que consegui... a quem devo tudo o que serei, o que terei e o que conseguirei... é tudo para eles, é tudo para nós.

Resumo

As redes de energia estão em constante crescimento e a liberalização do mercado energético foca os esforços na satisfação do cliente, garantindo a fiabilidade, qualidade e economia dos serviços prestados. Por outro lado, o aumento da demanda energética tem como consequência redes mais complexas e com geração distribuída, particularmente proveniente de fontes renováveis. Este cenário obriga ao acoplamento de várias redes, o que aumenta o risco e intensidade de correntes de curto-circuito, altamente prejudiciais para os equipamentos que integram a rede.

Os limitadores de corrente de curto-circuito surgem como a solução mais indicada para este problema e, sendo as propriedades intrínsecas dos supercondutores propícias a este tipo de aplicação, consideram-se para o efeito os limitadores de corrente supercondutores em particular. A implementação deste tipo de dispositivos pressupõe simulações, normalmente realizadas por *software* de modelização por elementos finitos, contudo, estas podem envolver tempos de processamento impraticáveis quando se tratam de dispositivos à escala real e/ou em redes complexas. Neste sentido, em sua substituição foi proposto um método de modelização do comportamento dinâmico de limitadores de corrente supercondutores indutivos, com o objectivo de realizar simulações dos mesmos em redes mais ou menos complexas, tornando o tempo de processamento incomparavelmente mais rápido.

O objectivo do presente trabalho é a construção de um limitador de corrente supercondutor indutivo à escala laboratorial, o qual é alvo de diferentes ensaios de limitação em diferentes condições. O limitador inclui um cilindro supercondutor de alta temperatura e é ensaiado com diferentes topologias de núcleos de ferro, sendo feito o estudo comparativo do seu desempenho tendo sempre em vista a aplicação e validação do referido método proposto, bem como a sua futura aplicabilidade em dispositivos à escala real.

Palavras-chave: Supercondutividade, limitador de corrente supercondutor, limitador indutivo, simulação.

Abstract

Electrical power networks are constantly growing and the energy market liberalization turns the attention and efforts to customer satisfaction, ensuring the reliability, quality and low prices of the services provided. Furthermore, with the increasing energetic demand comes more complex networks with embedded generation, particularly from renewable energy sources. This scene leads to the need of coupling several networks, which enhances the risk and intensity of fault currents, strongly hazardous for the electrical network equipment.

Fault current limiters emerge as the most suitable solution for this problem and since the inherent properties of superconducting materials are most propitious for this kind of applications, the superconducting fault current limiters are considered for this purpose. Prior to the device construction and installation, simulations are to be done in order to predict its performance, generally using finite elements modeling software. Nevertheless, analyzing full scale limiters in complex grids makes the computing simulation time very extensive and virtually impossible. Therefore, an alternative method was proposed to model and predict the performance of inductive fault current limiters, aiming to dramatically reduce the computing time, maintaining the reliability of the results in complex grids.

This project aims to construct a laboratory scale model of a limiter, which is used to perform several different experimental measurements, under various conditions. The limiter includes a high-temperature superconducting cylinder and is tested using different iron core topologies. The comparative study of the limiter's performances is made, always aiming to the application and validation of the referred proposed method, foreseeing a future application to predict the performance of full scale devices.

Keywords: Superconductor, short-circuit, fault current, superconducting fault current limiter, inductive limiter, finite elements modeling, simulation.

Simbologia

<i>B</i>	Densidade de fluxo magnético ou campo de indução magnética (T) ou ($\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>E</i>	Campo eléctrico ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>E</i>	Força Electromotriz (V). Também usado para o módulo do campo eléctrico ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
FMM	Força magnetomotriz ($\text{A} \cdot \text{espira}$)
<i>H</i>	Campo magnético ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
H_C	Campo magnético Crítico ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>I</i>	Corrente eléctrica (A)
I_C	Corrente crítica (A)
I_{SAT}^*	Corrente máxima do supercondutor (A)
<i>J</i>	Densidade de corrente ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>J</i>	Módulo da densidade de corrente ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
J_C	Densidade de corrente Crítica ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
<i>L</i>	Coeficiente de auto-indução principal (H)
<i>M</i>	Magnetização ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
<i>N</i>	Número de espiras de um enrolamento
N_1	Número de espiras do primário
<i>R</i>	Resistência eléctrica (Ω)
<i>t</i>	Tempo (s)
<i>T</i>	Temperatura (K)
T_C	Temperatura crítica (K)
<i>U</i>	Tensão Eléctrica (V)
W_{mag}	Energia magnética armazenada numa bobina ou anel supercondutor (J)
μ	Permeabilidade magnética ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo ou constante magnética ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
κ	Susceptibilidade magnética
λ	Profundidade de penetração (m)
ξ	Comprimento de coerência (m)
ρ	Resistividade eléctrica ($\Omega \cdot \text{m}$)
σ	Condutividade eléctrica ($\text{S} \cdot \text{m}$)
τ	Constante de tempo (s)
ϕ	Fluxo Magnético (Wb)

Notações

1G	Primeira geração
2G	Segunda geração
AC	<i>Alternating Current</i> , corrente alternada, termo também aplicado para tensão alternada
AT	Alta Tensão
Bi-2212	Supercondutor de composição química $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$
Bi-2223	Supercondutor de composição química $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{12}$
BSCCO	Designação genérica dos supercondutores de composição química $Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{6+2n}$, com $n = 0, 1, 2$. Lê-se “bisco”.
DC	<i>Direct current</i> , corrente contínua, termo também aplicado a tensão contínua
FEM	<i>Finite Elements Modeling</i> , termo aplicado para Modelização por Elementos Finitos
HTS	<i>High Temperature Superconductor</i> , termo aplicado para Supercondutor de Alta Temperatura
LCS	Limitador de Corrente Supercondutor
LTS	<i>Low Temperature Superconductor</i> , termo aplicado para Supercondutor de Baixa Temperatura
MHD	MagnetoHydroDynamic, termo aplicado para MagnetoHidroDinâmica
MT	Média Tensão
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura.
SBT	Supercondutor de Baixa Temperatura.
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> , termo aplicado para Electromagnetos Supercondutores para Armazenamento de Energia.
SQUID	Superconducting QUantum Interference Device, termo aplicado para Interferómetro Quântico Supercondutor
YBCO	Designação genérica dos supercondutores de composição química $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$,

onde δ é o conteúdo do oxigénio, que determina a supercondutividade do material. Lê-se “ibaco”.

Índice de Matérias

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJECTIVOS.....	2
1.3	SUMÁRIO DO TRABALHO DESENVOLVIDO	3
1.4	CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	3
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	SUPERCONDUTIVIDADE.....	8
2.1.1	<i>Introdução e Contexto Histórico.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Propriedades e Fenómenos.....</i>	<i>14</i>
2.1.2.1	Resistividade Nula	14
2.1.2.2	Efeito de Meissner: Diamagnetismo Perfeito.....	16
2.1.2.3	Superfície Crítica	18
2.1.3	<i>Tipos de Supercondutores.....</i>	<i>21</i>
2.1.3.1	Tipo I.....	22
2.1.3.2	Tipo II.....	23
2.1.4	<i>Modelização de Supercondutores.....</i>	<i>27</i>
2.1.4.1	Modelos de estado crítico.....	27
2.1.4.2	Lei da potência E-J.....	28
2.1.5	<i>Aplicações.....</i>	<i>29</i>
2.1.5.1	Máquinas Eléctricas Rotativas	31
2.1.5.2	Cabos de Energia	33
2.1.5.3	Armazenamento de Energia (SMES).....	35
2.1.5.4	Transformadores e Limitadores de Corrente.....	36
2.1.6	<i>Conclusão.....</i>	<i>38</i>
2.2	LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (LCS).....	38
2.2.1	<i>Introdução.....</i>	<i>38</i>
2.2.2	<i>Limitadores de Corrente Supercondutores vs Soluções Convencionais.....</i>	<i>39</i>
2.2.3	<i>Limitadores de Corrente numa Rede de Energia</i>	<i>41</i>
2.2.4	<i>Tipos de Limitadores de Corrente de Curto-circuito.</i>	<i>44</i>
2.2.4.1	Limitadores de corrente Resistivos.....	45
2.2.4.2	Limitadores de corrente indutivos	49
2.2.4.3	Limitadores de corrente rectificadores.....	50
2.2.5	<i>Conclusão.....</i>	<i>53</i>
2.3	LIMITADORES DE CORRENTE INDUTIVOS	53

2.3.1	<i>Introdução.....</i>	53
2.3.2	<i>Indutivo, de Blindagem Magnética ou Transformador.....</i>	53
2.3.3	<i>Núcleos de Ferro Saturados ou Núcleos de Ferro Polarizados em DC.....</i>	57
2.3.4	<i>Outros Tipos.....</i>	60
2.3.4.1	Híbrido.....	61
2.3.4.2	Captura de Fluxo.....	61
2.3.4.3	Com núcleo de Ar.....	63
2.3.5	<i>Conclusão.....</i>	63
2.4	CONCLUSÃO.....	63
3	CONSTRUÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE.....	65
3.1	INTRODUÇÃO.....	65
3.2	NÚCLEOS DE FERRO.....	66
3.3	ELEMENTO SAT.....	67
3.4	CONSTRUÇÃO DAS BOBINAS.....	68
3.5	MONTAGEM DO LIMITADOR.....	69
3.6	CONCLUSÃO.....	70
4	MODELIZAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE.....	71
4.1	INTRODUÇÃO.....	71
4.2	MODELO BASEADO NO PRINCÍPIO DO TRANSFORMADOR.....	71
4.3	MODELO BASEADO NA CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO LCS.....	73
4.4	OBTENÇÃO DO MODELO.....	74
4.4.1	<i>Corrente Máxima do Supercondutor.....</i>	<i>74</i>
4.4.1.1	Resultados de Simulação.....	75
4.4.1.2	Resultados Experimentais.....	75
4.4.1.3	Comparações.....	78
4.4.2	<i>Características Magnéticas dos Núcleos de Ferro.....</i>	<i>80</i>
4.4.2.1	Resultado de Simulação.....	80
4.4.2.2	Resultados Experimentais.....	80
4.4.2.3	Comparações.....	87
4.4.3	<i>Ciclo de Histerese Máximo do LCS.....</i>	<i>87</i>
4.5	CONCLUSÕES.....	87
5	COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LIMITADOR DE CORRENTE.....	89
5.1	INTRODUÇÃO.....	89
5.2	SIMULAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE EM CONDIÇÃO DE FALHA.....	89
5.3	MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	90
5.4	ENSAIO DO LIMITADOR.....	96
5.4.1	<i>Núcleo Fechado.....</i>	<i>98</i>
5.4.2	<i>Núcleo Aberto.....</i>	<i>103</i>
5.4.2.1	Comprimento Menor.....	103
5.4.2.2	Comprimento Médio.....	105
5.4.2.3	Comprimento Maior.....	106

5.5	CONCLUSÕES.....	107
6	COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	109
6.1	INTRODUÇÃO	109
6.2	VALIDAÇÃO DOS MODELOS BASEADOS NA CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO LCS.....	109
6.2.1	<i>LCS com Núcleo Fechado.....</i>	<i>110</i>
6.2.2	<i>LCS com Núcleo Aberto Menor.....</i>	<i>111</i>
6.2.3	<i>LCS com Núcleo Aberto Médio</i>	<i>112</i>
6.2.4	<i>LCS com Núcleo Aberto Maior.....</i>	<i>113</i>
6.2.5	<i>Conclusões</i>	<i>114</i>
6.3	COMPARAÇÕES ENTRE OS DIFERENTES LCSS	115
6.3.1	<i>Corrente presumida de 25,8 A.....</i>	<i>115</i>
6.3.2	<i>Corrente presumida de 51,4 A.....</i>	<i>117</i>
6.3.3	<i>Corrente presumida de 102,9 A.....</i>	<i>118</i>
6.3.4	<i>Conclusões</i>	<i>119</i>
6.4	LIMITAÇÃO EM DIFERENTES INSTANTES DE TEMPO.....	120
6.5	CONCLUSÃO.....	122
7	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	125
8	BIBLIOGRAFIA.....	129

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – HEIKE KAMERLINGH ONNES (1853-1926) E O LIQUIDIFICADOR DE HÉLIO NO SEU LABORATÓRIO EM LEIDEN, 1910. PRÊMIO NOBEL DA FÍSICA EM 1913. RETIRADO DE (DELFT, 2008).	8
FIGURA 2.2 – DIFERENTES TEORIAS SOBRE O COMPORTAMENTO DOS METAIS EM BAIXAS TEMPERATURAS E RESPECTIVOS AUTORES. ADAPTADO DE (IRESON, 2012).	8
FIGURA 2.3 – RESISTÊNCIA DE UMA AMOSTRA DE MERCÚRIO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA ABSOLUTA. GRÁFICO DE KAMERLINGH ONNES QUE MARCOU A DESCOBERTA DA SUPERCONDUTIVIDADE. RETIRADO DE (BRUYN OUBOTER, 1987).	9
FIGURA 2.4 – WALTHER MEISSNER (1882 - 1974) À ESQUERDA E ROBERT OCHSENFELD (1901 - 1993) À DIREITA (FONTE: HTTP://WWW.PTB.DE/ CMS/EN/IB/GESCHICHTE-IB.HTML).	10
FIGURA 2.5 – FRITZ LONDON (1900 – 1954) E HEINZ LONDON (1907 – 1970) (FONTE: HTTP://WWW.DIPITY.COM/PEPPELIBERTI/THE-HISTORY-OF-SUPERCONDUCTIVITY/).	10
FIGURA 2.6 - JOHN BARDEEN, LEON NEIL COOPER E JOHN ROBERT SCHRIEFFER EM 1972, ANO EM QUE FORAM GALARDOADOS COM O NOBEL DA FÍSICA (FONTE: HTTP://WWW.NYTIMES.COM/2008/01/08/SCIENCE/08SUPER.HTML).	11
FIGURA 2.7 – ALEXEI ALEXEYEVICH ABRIKOSOV, PRÊMIO NOBEL DA FÍSICA EM 2003. RETIRADO DE (BLUNDELL, 2009).	11
FIGURA 2.8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS VÓRTICES INTRODUZIDOS PELA TEORIA DE ABRIKOSOV. RETIRADO DE (BLUNDELL, 2009).	11
FIGURA 2.9 – BRIAN DAVID JOSEPHSON, CO-GALARDOADO COM O NOBEL DA FÍSICA EM 1973 (FONTE: HTTP://WWW.DIPITY.COM/PEPPELIBERTI/THE-HISTORY-OF-SUPERCONDUCTIVITY/).	12
FIGURA 2.10 - DA ESQUERDA PARA A DIREITA, JOHANNES GEORG BEDNORZ E KARL ALEXANDER MÜLLER, INVESTIGADORES IBM E DETENTORES DO PRÊMIO NOBEL DA FÍSICA EM 1987 (FONTE: HTTP://WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/IBM_RESEARCH_ZURICH/5578970567/SIZES/O/IN/SET-72157626190634967/).	13
FIGURA 2.11 - PAUL CHING-WU CHU (FONTE: HTTP://WWW.DIPITY.COM/PEPPELIBERTI/THE-HISTORY-OF-SUPERCONDUCTIVITY/).	13
FIGURA 2.12 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA CRÍTICA DE TRANSIÇÃO DOS SUPERCONDUTORES, DESDE A SUA DESCOBERTA ATÉ AOS DIAS DE HOJE. ADAPTADO DE (HTTP://WWW.CCAS-EB.ORG/SUPERCONDUCTIVITY/#IMAGE1).	14
FIGURA 2.13 – CRIAÇÃO DE UMA CORRENTE PERSISTENTE NUM ANEL SUPERCONDUTOR PARA PROVAR EXPERIMENTALMENTE A SUA RESISTIVIDADE PERFEITA. ADAPTADO DE (BUCKEL AND KLEINER, 2004).	15
FIGURA 2.14 – EFEITO DE MEISSNER NUM SUPERCONDUTOR. PARA $T < T_C$, A SOMA DO CAMPO MAGNÉTICO APLICADO COM O CAMPO MAGNÉTICO GERADO PELAS CORRENTES DE BLINDAGEM RESULTA NUMA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NULA DENTRO DO SUPERCONDUTOR. ADAPTADO DE (CARDWELL AND GINLEY, 2003).	17
FIGURA 2.15 – LEVITAÇÃO MAGNÉTICA DEMOSTRATIVA DO EFEITO DE MEISSNER NA PRESENÇA DE UM CAMPO MAGNÉTICO APLICADO (FONTE: HTTP://PHYSICS.UCSD.EDU/~JORGE/MEISSNER/MEISSNER4.MOV).	17

FIGURA 2.16 – COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPORTAMENTOS TERMODINÂMICOS DE UM SUPERCONDUTOR E UM CONDUTOR PERFEITO NA PRESENÇA DE CAMPOS DE INDUÇÃO MAGNÉTICA APLICADOS.	19
FIGURA 2.17 – DEPENDÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICO COM A TEMPERATURA, CORRESPONDENTE À EXPRESSÃO (2.10), PARA SUPERCONDUTORES DO TIPO I.	20
FIGURA 2.18 - DEPENDÊNCIA DA DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA COM A TEMPERATURA, CORRESPONDENTE À EXPRESSÃO (2.13), PARA SUPERCONDUTORES DO TIPO I.	20
FIGURA 2.19 – SUPERFÍCIE CRÍTICA DE UM SUPERCONDUTOR. A REGIÃO DE OPERAÇÃO DO MATERIAL NESTE ESTADO É NO INTERIOR DO VOLUME SOMBREADO. ADAPTADO DE (LEE, 2002).	21
FIGURA 2.20 – CURVA DA MAGNETIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA TRANSIÇÃO DE ESTADO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO I. O DECLIVE DA RECTA É UNITÁRIO.	22
FIGURA 2.21 – CAMPOS MAGNÉTICOS INTERNO E EXTERNO NA TRANSIÇÃO DE ESTADO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO I. O DECLIVE DA RECTA É UNITÁRIO.	23
FIGURA 2.22 – CURVA DA MAGNETIZAÇÃO EM FUNÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO APLICADO NA TRANSIÇÃO DE UM SUPERCONDUTOR IDEAL DO TIPO II. O DECLIVE DA RECTA É UNITÁRIO.	24
FIGURA 2.23 – ESPAÇO H-T NUM SUPERCONDUTOR DO TIPO II ILUSTRANDO AS ÁREAS CORRESPONDENTES A CADA UM DOS TRÊS ESTADOS POSSÍVEIS.	24
FIGURA 2.24 - CAMPOS MAGNÉTICOS INTERNO E EXTERNO NA TRANSIÇÃO DE ESTADO DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO II. 25	
FIGURA 2.25 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA REDE DE VÓRTICES NO ESTADO MISTO NUM SUPERCONDUTOR DO TIPO II. EM TORNO DOS VÓRTICES CIRCULAM AS CORRENTES DE BLINDAGEM. ADAPTADA DE (BUCKEL AND KLEINER, 2004).	26
FIGURA 2.26 – VISTA MICROSCÓPICA DA REDE DE VÓRTICES NUM MATERIAL SUPERCONDUTOR DO TIPO II, RECORRENDO A UMA TÉCNICA DE CONTRASTE MAGNÉTICO. UM ESBOÇO DA ESTRUTURA TRIANGULAR DA REDE É MOSTRADO À DIREITA. RETIRADO DE (BLUNDELL, 2009).	26
FIGURA 2.27 – MATERIAIS SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA NAS SUAS DIFERENTES FORMAS E GEOMETRIAS (FONTE: HTTP://NANOPARS.ORG/PAGE/SUPER-CONDUCTOR.ASPX E HTTP://WWW.BRUKER-EST.COM/HTS-TAPES .HTML).	27
FIGURA 2.28 – INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO N NA LEI DA POTÊNCIA E-J.	29
FIGURA 2.29 – PROJECCÕES DA RELAÇÃO CUSTO/DESEMPENHO DOS SATs A 77 K. ADAPTADO DE (TSUKAMOTO, 2005). 30	
FIGURA 2.30 – PREVISÃO DA ISIS DO INVESTIMENTO RELATIVO EM CADA SECTOR NO MERCADO GLOBAL DOS SUPERCONDUTORES. ADAPTADO DE (HTTP://SUPERCONDUCTORS.ORG/ISISPROJ.GIF)	31
FIGURA 2.31 – PANORAMA GERAL DAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E DE POTÊNCIA DOS SATs AO LONGO DO TEMPO. RETIRADO DE (TSUKAMOTO, 2005).	32
FIGURA 2.32 – COMPARAÇÃO ENTRE UM MOTOR SAT E UM CONVENCIONAL PARA O CASO DE UM MOTOR DE 36.5 MW PARA PRUPULSÃO NAVAL. ADAPTADO DE (HTTP://APPS.SHAREHOLDER.COM /SEC/VIEWERCONTENT.ASPX?COMPANYID=AMSC&DOCID=4482230).	32
FIGURA 2.33 – A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA ESTRUTURA DO CABO SAT. B) PERCURSO DO CABO E INSTALAÇÕES PERIFÉRICAS NA SUBESTAÇÃO DE ICHEON DA KEPCO. ADAPTADO DE (SONG-HO, HYUNG-SUK ET AL., 2012).	34
FIGURA 2.34 – A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICO DA ESTRUTURA DO CABO SAT. B) FINAL DO CABO INSTALADO NA LIPA. RETIRADO DE (MAGUIRE, SCHMIDT ET AL., 2009).	35
FIGURA 2.35 - SISTEMA SMES DE 1 MVA INSTALADO EM BAIYIN, NA CHINA. RETIRADO DE (JINGYE, SHAOTAO ET AL., 2012).	36
FIGURA 2.36 – A) ESBOÇO DOS COMPONENTES DO TRANSFORMADOR DE 5/10 MVA. B) TRANSPORTE DO TRANSFORMADOR EM FASE CONCLUÍDA. RETIRADO DE (PLEVA AND SCHWENTERLY, 2004).	37

FIGURA 2.37 – POSSÍVEIS APLICAÇÕES BENÉFICAS DE LCS EM REDES DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO. ADAPTADO DE (SCHMITT, 2006).	43
FIGURA 2.38 – ACOPLAMENTO DE DUAS SUB-REDES DE 110 kV COM LCS, REDUZINDO O NÚMERO DE TRANSFORMADORES NECESSÁRIOS. ADAPTADO DE (SCHMITT, 2006).	43
FIGURA 2.39 – ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RESISTIVO PURO.	45
FIGURA 2.40 – FUNCIONAMENTO DE UM LCS RESISTIVO PURO. ADAPTADO DE (NOE AND STEURER, 2007).	46
FIGURA 2.41 – APARATO COMPLETO DO LCS TRIFÁSICO RESISTIVO CURL10. ADAPTADO DE (NEUMANN, 2006).	46
FIGURA 2.42 – LCS TRIFÁSICO RESISTIVO COMPLETO E INSTALADO NA CENTRAL ELÉCTRICA “BOXBERG” EM SAXONY, ALEMANHA (PROJECTO 2). RETIRADO DE (DOMMERQUE, KRÄMER ET AL., 2010).	47
FIGURA 2.43 - ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RESISTIVO COM AMORTECIMENTO ASSISTIDO POR CAMPO MAGNÉTICO.	48
FIGURA 2.44 – ELEMENTO SAT DO PROJECTO CULT110 EM FORMA DE TUBO MACIÇO, INTRODUZIDO DENTRO DE UMA BOBINA CONDUTORA NORMAL E LIGADOS EM PARALELO. RETIRADO DE (ELSCHNER, STEMMLER ET AL., 2008).	48
FIGURA 2.45 - ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS RECTIFICADOR OU “BRIDGE TYPE”.	50
FIGURA 2.46 – CARACTERÍSTICA DO DÍODO E DAS CORRENTES NUM LCS RECTIFICADOR. ADAPTADO DE (NOE AND STEURER, 2007).	51
FIGURA 2.47 – LCS RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE 10,5 kV INSTALADO NA SUBESTAÇÃO DE GAOXI, EM HUNAN NA CHINA. RETIRADO DE (LI, GONG ET AL., 2007).	52
FIGURA 2.48 – A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM LCS INDUTIVO. ADAPTADA DE (ZONG, WANG ET AL., 2003).	54
FIGURA 2.49 – REPRESENTAÇÃO AXIAL DA INDUÇÃO MAGNÉTICA NUM LCS INDUTIVO. CONSTRUÍDO A PARTIR DE (JANOWSKI, KOZAK ET AL., 2003, PINA, NEVES ET AL., 2010).	54
FIGURA 2.50 – ANÉIS CERÂMICOS DE BI-2212 UTILIZADOS DO LCS DA ABB DE 1,2 MVA. RETIRADO DE (PAUL, LAKNER ET AL., 1997).	56
FIGURA 2.51 – LCS TRIFÁSICO DE 1,2 MVA INSTALADO NUMA LINHA AUXILIAR DA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE “KRAFTWERK AM LÖNTSCH”, NA SUÍÇA. RETIRADO DE (PAUL, LAKNER ET AL., 1997).	56
FIGURA 2.52 – A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM LCS DE NÚCLEOS SATURADOS OU POLARIZADOS EM DC. ADAPTADA DE (HUI, ZHENGJIAN ET AL., 2009).	57
FIGURA 2.53 – PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS OU DE NÚCLEOS POLARIZADOS EM DC. ADAPTADO DE (RAJU, PARTON ET AL., 1982).	58
FIGURA 2.54 – LIMITADOR TRIFÁSICO DE NÚCLEOS SATURADOS DE 35 kV/90 MVA, DESENVOLVIDO PELA INNOPOWER. ADAPTADO DE (YIN, GONG ET AL., 2009).	60
FIGURA 2.55 – ELEMENTOS DC NO LCS DE 35 kV/90 MVA DA INNOPOWER, INCLUINDO A BOBINA E UNIDADE DE CONTROLO. RETIRADO DE (HUI, ZHENGJIAN ET AL., 2009).	60
FIGURA 2.56 – LCS DE NÚCLEOS SATURADOS DE 35 kV/90 MVA INSTALADO NUMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 35 kV NA SUBESTAÇÃO DE PUJI, NA CHINA. RETIRADO DE (YIN, GONG ET AL., 2009).	60
FIGURA 2.57 – ESQUEMA ELÉCTRICO DE UM LCS HÍBRIDO.	61
FIGURA 2.58 - ELEMENTOS RESISTIVOS COMPOSTOS POR TIRAS DE YBCO, A USAR NO LCS HÍBRIDO DE 400 kVA. RETIRADO DE (GRANADOS, PUIG ET AL., 2002).	61
FIGURA 2.59 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM LSC DO TIPO CAPTURA DE FLUXO.	62
FIGURA 3.1 – FORMATO E DIMENSÕES (EM MILÍMETROS) DOS NÚCLEOS DE FERRO.	66
FIGURA 3.2 – ASPECTO REAL DOS NÚCLEOS DE FERRO UTILIZADOS NO LCS INDUTIVO.	67
FIGURA 3.3 – CILINDRO SAT USADO NO LCS INDUTIVO CONSTRUÍDO.	67
FIGURA 3.4 – MÉTODO PARA CONFIRMAÇÃO DO NÚMERO DE ESPIRAS DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO.	68

FIGURA 3.5 – MOLDES DE BAQUELITE USADOS NA CONSTRUÇÃO DAS BOBINAS.....	69
FIGURA 3.6 – ASPECTO FINAL DAS BOBINAS CONSTRUÍDAS. SOMENTE A DE MENOR NÚMERO DE ESPIRAS FOI UTILIZADA EM ENSAIOS VÁLIDOS.	69
FIGURA 3.7 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO LCS INDUTIVO COMPLETO.	70
FIGURA 3.8 – ASPECTO REAL DO LCS INDUTIVO CONSTRUÍDO.	70
FIGURA 4.1 – ESQUEMA EQUIVALENTE DE <i>STEINMETZ</i> DO LCS E RESPECTIVOS PARÂMETROS CONSTITUINTES.	72
FIGURA 4.2 – MODELO DO CICLO DE HISTERESE MÁXIMO DO LCS INDUTIVO. RETIRADO DE (PINA, 2010).	74
FIGURA 4.3 – CORRENTE MÁXIMA DO SAT, OBTIDA POR SIMULAÇÃO, <i>ISAT</i> * = 694 A . RETIRADO DE (PINA, 2010). ...	75
FIGURA 4.4 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO MÉTODO PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE MÁXIMA DO SAT.	76
FIGURA 4.5 – ENSAIO EXPERIMENTAL DA CARACTERÍSTICA DO SAT EM LABORATÓRIO. VISTA COMPLETA E PORMENOR.	76
FIGURA 4.6 – CORRENTES DE BLINDAGEM INDUZIDAS NO CILINDRO EM FUNÇÃO DA FORÇA MAGNETOMOTRIZ DO PRIMÁRIO.	77
FIGURA 4.7 – CORRENTE NO SAT, <i>iSAT</i> E FORÇA MAGNETOMOTRIZ NO PRIMÁRIO, <i>N_{1ip}</i> , NO TEMPO.	77
FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DA DESFASAGEM ENTRE A CORRENTE DO SAT E A FORMA MAGNETOMOTRIZ DO PRIMÁRIO, EM FUNÇÃO DA ÚLTIMA.	78
FIGURA 4.9 - CORRENTES DE BLINDAGEM INDUZIDAS NO CILINDRO SAT, OBTIDAS POR SIMULAÇÃO, RECORRENDO AO MODELO DE KIM E LEI DA POTÊNCIA E-J.	79
FIGURA 4.10 – CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DOS QUATRO NÚCLEOS DE FERRO, UM FECHADO E TRÊS ABERTOS DE DIFERENTES COMPRIMENTOS. RETIRADO DE (PINA, 2010).	80
FIGURA 4.11 – ESQUEMA DA MONTAGEM REALIZADA EM LABORATÓRIO PARA OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DOS NÚCLEOS DE FERRO.	81
FIGURA 4.12 – ESQUEMA ELÉCTRICO DO CIRCUITO DO INTEGRADOR.	81
FIGURA 4.13 – ASPECTO DO INTEGRADOR E RESISTÊNCIA DE AMOSTRAGEM UTILIZADOS EM LABORATÓRIO.	84
FIGURA 4.14 – ENSAIO EXPERIMENTAL DA CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO FECHADO EM LABORATÓRIO.	84
FIGURA 4.15 – CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO FECHADO.	85
FIGURA 4.16 – CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO DE COMPRIMENTO MENOR.....	85
FIGURA 4.17 – CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO DE COMPRIMENTO MÉDIO.....	85
FIGURA 4.18 – CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO DE COMPRIMENTO MAIOR.	86
FIGURA 4.19 – CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DOS NÚCLEOS DE FERRO ABERTOS.	86
FIGURA 4.20 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DOS QUATRO NÚCLEOS, SIMULADAS PELO FLUX2D, COM O CICLO DE HISTERESE MÁXIMO DO LCS PARA CADA NÚCLEO. RETIRADO DE (PINA, 2010).....	88
FIGURA 5.1 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO LCS, PELA METODOLOGIA PROPOSTA, PARA UMA IMPEDÂNCIA DE REDE RESISTIVA E COM UMA FALHA APLICADA EM <i>t</i> = 20 ms . RETIRADO DE (PINA, 2010).	91
FIGURA 5.2 – PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS NI USB-6009. FONTE: HTTP://SINE.NI.COM/IMAGES/PRODUCTS/US/040716_USB6008_M.JPG	92
FIGURA 5.3 – MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSAIO DO LCS EM CONDIÇÕES DE FALHA.	92
FIGURA 5.4 – CIRCUITO ELÉCTRICO DA MONTAGEM AMPLIFICADORA DIFERENCIAL.	93
FIGURA 5.5 - CIRCUITO ELÉCTRICO DA MONTAGEM AMPLIFICADORA DIFERENCIAL USADO ANTES DO CANAL DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	93
FIGURA 5.6 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS INCLUINDO A FONTE DE ALIMENTAÇÃO DC, À ESQUERDA.	95
FIGURA 5.7 – CARACTERÍSTICA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO IMPLEMENTADO POR <i>SOFTWARE</i> NA AQUISIÇÃO DE SINAIS.	95

FIGURA 5.8 – TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA DE 400 V/120 V, 12,5 A/41,7 A UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.	96
FIGURA 5.9 – MONTAGEM EXPERIMENTAL COMPLETA E EM PORMENOR DO ENSAIO DO LCS SOB CONDIÇÕES DE FALHA.	97
FIGURA 5.10 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 25,8 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	98
FIGURA 5.11 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 25,8 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	99
FIGURA 5.12 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 51,3 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	100
FIGURA 5.13 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 51,3 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	101
FIGURA 5.14 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 103,4 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	102
FIGURA 5.15 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 103,4 \text{ A}$ COM NÚCLEO FECHADO.	102
FIGURA 5.16 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 103,1 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MENOR.	104
FIGURA 5.17 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 103,1 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MENOR.	104
FIGURA 5.18 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 102,9 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MÉDIO.	105
FIGURA 5.19 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 102,9 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MÉDIO.	106
FIGURA 5.20 – ANDAMENTO TEMPORAL DA CORRENTE DE LINHA APÓS UM CURTO-CIRCUITO APLICADO EM $t = 60 \text{ ms}$. A CORRENTE PRESUMIDA TAMBÉM É MOSTRADA. CASO DE $iPres = 102,9 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MAIOR.	107
FIGURA 5.21 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA. CASO DE $iPres = 102,9 \text{ A}$ COM NÚCLEO ABERTO MAIOR.	107
FIGURA 6.1 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , E CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO FECHADO, ψ_0 , PARA DIFERENTES CORRENTES PRESUMIDAS.	110
FIGURA 6.2 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , E CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO MENOR, ψ_0 , PARA DIFERENTES CORRENTES PRESUMIDAS.	112
FIGURA 6.3 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , E CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO MÉDIO, ψ_0 , PARA DIFERENTES CORRENTES PRESUMIDAS.	113
FIGURA 6.4 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , E CARACTERÍSTICA MAGNÉTICA DO NÚCLEO ABERTO MAIOR, ψ_0 , PARA DIFERENTES CORRENTES PRESUMIDAS.	114
FIGURA 6.5 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS DIFERENTES LCSs DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 25,8 A.	116
FIGURA 6.6 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS DIFERENTES LCSs DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 51,4 A.	117

FIGURA 6.7 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS DIFERENTES LCSS DURANTE UMA FALHA, ψ_{LCS} , PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 102,9 A.	118
FIGURA 6.8 – EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA INTRODUZIDA EM DOIS INSTANTES DIFERENTES, $t1$ E $t2$. CASO DE NÚCLEO ABERTO MAIOR E CORRENTE PRESUMIDA DE $iPres = 102,9 A$	121
FIGURA 6.9 - EXCURSÃO NO PLANO $i\psi$ DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO LCS DURANTE UMA FALHA INTRODUZIDA EM DOIS INSTANTES DIFERENTES, $t1$ E $t2$. CASO DE NÚCLEO FECHADO E CORRENTE PRESUMIDA DE $iPres = 25,8 A$	122

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – ALGUNS EXEMPLOS DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES DO TIPO I E RESPECTIVOS VALORES DE TEMPERATURA E CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICOS (FONTE: HTTP://WWW.KAYELABY.NPL.CO.UK/GENERAL_PHYSICS/2_6/2_6_4.HTML).	23
TABELA 2.2 – ALGUNS EXEMPLOS DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES DO TIPO II E RESPECTIVOS VALORES DE TEMPERATURA E CAMPOS MAGNÉTICOS CRÍTICOS (FONTE: HTTP://WWW.KAYELABY.NPL.CO.UK/GENERAL_PHYSICS/2_6/2_6_4.HTML).	26
TABELA 2.3 – ESPECIFICAÇÕES DE PROJECTO DO CABO SAT DA <i>AMERICAN SUPERCONDUCTORS</i> INSTALADO NA LIPA. ADAPTADO DE (MAGUIRE, SCHMIDT ET AL., 2009).	34
TABELA 2.4 – ESPECIFICAÇÕES DE PROJECTO DO SMES DE 1 MJ. ADAPTADO DE (JINGYE, SHAOTAO ET AL., 2012).	36
TABELA 2.5 – ESPECIFICAÇÕES DE PROJECTO DO TRANSFORMADOR SAT DE 5/10 MVA. ADAPTADO DE (WEBER, REIS ET AL., 2005).	37
TABELA 2.6 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE PROTECÇÃO CONTRA FALHAS (LEUNG, 1997).	40
TABELA 2.7 – CLASSIFICAÇÃO DOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE ACORDO COM OS SEUS DIFERENTES TIPOS E CARACTERÍSTICAS.	44
TABELA 2.8 – ESPECIFICAÇÕES DOS PROJECTOS DE APLICAÇÃO COMERCIAL DE LCS RESISTIVOS. ADAPTADA DE (DOMMERQUE, KRÄMER ET AL., 2010).	47
TABELA 2.9 – ESPECIFICAÇÕES DO PROJECTO CULT110. CRIADO COM BASE EM (ELSCHNER, BREUER ET AL., 2007).	49
TABELA 2.10 – ESPECIFICAÇÕES DE PROJECTO DA BOBINA SUPERCONDUTORA DO LCS RECTIFICADOR TRIFÁSICO. ADAPTADO DE (LI, GONG ET AL., 2007).	52
TABELA 2.11 – CARACTERÍSTICAS DO LCS INDUTIVO DE 1,2 MVA DA ABB. CONSTRUÍDO A PARTIR DE (PAUL AND CHEN, 1998).	56
TABELA 2.12 – ESPECIFICAÇÕES GERAIS DO LCS DE NÚCLEOS SATRADOS DE 35 kV/90 MVA. ADAPTADO DE (YIN, GONG ET AL., 2009).	59
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO SAT UTILIZADO NO LCS.	67
TABELA 5.1 – CARACTERÍSTICAS DOS CANAIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	95
TABELA 5.2 – DIFERENTES CORRENTES PRESUMIDAS ENSAIADAS.	97
TABELA 6.1 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS DIFERENTES LCS PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 25,8 A.	116
TABELA 6.2 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS DIFERENTES LCS PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 51,4 A.	118
TABELA 6.3 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHOS DOS DIFERENTES LCS PARA UMA CORRENTE PRESUMIDA NA ORDEM DOS 102,9 A.	119



1 Introdução

1.1 *Motivação*

O mercado mundial dos supercondutores tem vindo a crescer muito significativamente nos últimos anos. Os processos de fabrico destes materiais são cada vez mais eficientes, o que se traduz num aumento da sua relação qualidade/preço, bem como uma redução nos custos dos equipamentos adjacentes à sua aplicação. Por esta razão, os materiais supercondutores encontram cada vez mais aplicações práticas, que se mostram progressivamente mais viáveis, algumas delas caminhando para a comercialização, particularmente na indústria.

O sector energético engloba um mercado cada vez mais competitivo, onde, seja ou não liberal, a satisfação do cliente é a principal prioridade. Neste sentido, existe uma constante preocupação na redução dos custos do serviço, com a garantia de que este seja de qualidade e fiável. Dado o panorama actual do sector energético a nível mundial, estas são premissas cada vez mais difíceis de garantir, dada a crise de recursos energéticos face ao aumento da demanda energética. Por esta razão, as redes energéticas surgem inevitavelmente mais complexas, principalmente em zonas de elevada densidade populacional ou industrial, onde a geração distribuída proveniente essencialmente de fontes de energia renovável está cada vez mais presente. Este é um cenário que contribui para o aparecimento e intensificação de falhas na rede, geralmente ao nível da distribuição, o que faz surgir elevadas correntes de curto-circuito capazes de danificar severamente os equipamentos da rede, podendo levar a linha a ficar fora de serviço.

Existem várias tecnologias frequentemente usadas para solucionar o problema das correntes de curto-circuito na rede, e.g. os disjuntores de alta corrente, fusíveis, transformadores de alta impedância, bobinas com núcleo de ar ou alterações estruturais na rede. Apesar de todos eles apresentarem desvantagens e de nenhum se mostrar verdadeiramente eficiente a nível económico, estes são métodos tradicionalmente utilizados.

No entanto, surge uma tecnologia que indiscutivelmente apresenta melhores desempenhos na limitação de correntes de falha, os limitadores de corrente. Sendo uma aplicação directa dos materiais supercondutores, os limitadores de corrente supercondutores em particular enfrentam neste momento barreiras à penetração de mercado, não só de cariz tecnológico mas também económico.

Apesar de já haver dispositivos deste tipo a funcionar em condições reais, a sua implementação envolve estudos teóricos e simulações prévias para modelizar o dispositivo e prever o seu comportamento na rede. Contudo, para dispositivos à escala real em redes complexas, as simulações envolvem tempos de processamento que as tornam inviáveis. No sentido de colmatar estas lacunas, foi proposto em (Pina, 2010) um método rápido e simples que permite modelizar os limitadores e efectuar estas simulações em tempos de computação irrisórios. Assim, uma vez que estes modelos foram validados somente com base em simulações, a principal motivação desta dissertação é validar o referido método com resultados experimentais, potenciando a sua aplicação em dispositivos de limitação à escala real, facilitando assim a penetração de mercado dos limitadores de corrente supercondutores e da supercondutividade em geral.

1.2 Objectivos

Todo o trabalho experimental desenvolvido tem por base o estudo e aplicação de limitadores de corrente indutivos focando a questão da validação experimental da ferramenta proposta em (Pina, 2010), que permite a modelização e simulação do desempenho e comportamentos dinâmicos destes dispositivos em redes de energia, de forma incomparavelmente mais rápida face aos tradicionais métodos de modelização por elementos finitos.

Em torno desta questão, os principais objectivos são:

- Construção de um limitador de corrente supercondutor indutivo à escala laboratorial.
- Modelização do referido limitador com base em resultados experimentais, utilizando diferentes topologias de núcleos de ferro.
- Ensaio do dispositivo em diferentes condições de falha a fim de avaliar o seu comportamento dinâmico perante correntes de curto-circuito.
- Estudo comparativo dos resultados, com vista à validação experimental da ferramenta de modelização proposta.

1.3 Sumário do Trabalho Desenvolvido

A supercondutividade é um tema imensamente vasto, sendo que o seu estudo exaustivo sai fora do âmbito desta dissertação. Esta foca-se somente nos limitadores de corrente supercondutores indutivos, particularmente com recurso a cilindros maciços de material supercondutor de alta temperatura. Assim, somente para o estado da arte foi feito um desvio, abordando a história, propriedades, tipo e aplicações dos supercondutores, que ainda assim são suficientes para que o desvio seja considerável.

No que diz respeito ao trabalho experimental propriamente dito, este foi, como qualquer trabalho de cariz experimental, algo moroso e com os seus previstos imprevistos. O trabalho envolveu uma forte componente laboratorial, com uso de diversos materiais e equipamentos, e portanto acabam sempre por surgir as adversidades próprias deste tipo de trabalhos, que têm de ser ultrapassadas de modo a garantir a sua continuidade. Adicionalmente, muito do trabalho desenvolvido produziu resultados que por diversas razões acabaram por ser descartados, o que faz com que parte do trabalho desenvolvido não se reflita neste documento. Apresentam-se então, de forma sucinta, as principais fases do trabalho, ignorando alguns procedimentos menores mas não menos importantes no interior de cada uma:

- Construção das bobinas a integrar no limitador de corrente.
- Construção e montagem do limitador, o qual inclui diversos núcleos de ferro e um cilindro supercondutor de alta temperatura.
- Ensaio experimental do cilindro supercondutor, a fim de obter a sua característica e corrente máxima.
- Ensaio experimental de cada um dos núcleos de ferro, para obter a sua característica magnética.
- Ensaio do limitador de corrente em diversas condições de falha, para cada núcleo de ferro distinto e em diferentes instantes de tempo.
- Análise comparativa dos resultados ao nível dos diferentes núcleos usados e das diferentes condições de falha.
- Validação experimental do método de modelização proposto.

1.4 Contribuições Originais

As contribuições originais desta dissertação consistem essencialmente na avaliação de um modelo para limitadores de corrente indutivos proposto anteriormente, baseada em dados experimentais. O modelo do limitador tem por base a obtenção isolada das características experimentais dos seus materiais constituintes, nomeadamente do primário do

dispositivo, que consiste essencialmente na característica magnética do núcleo de ferro, e do cilindro supercondutor de alta temperatura. A sua construção experimental permitiu avaliar o modelo teórico formulado previamente, o que contribuiu para a confirmação de alguns dos seus atributos e a para o refinar de alguns outros, no sentido de convergir os resultados teóricos com os experimentais. Considera-se ainda a metodologia experimental usada na obtenção da característica do cilindro supercondutor, i.e., das correntes que nele circulam, uma contribuição original, já que é feita uma medição real e fidedigna dessa grandeza no material supercondutor, factor indispensável na construção experimental descrita anteriormente.

Desta dissertação surgiram contributos para a publicação dos seguintes artigos científicos:

1. João Murta Pina, Pedro Pereira, Anabela Pronto, Pedro Arsénio, Tiago Silva, "Modelling and Simulation of Inductive Fault Current Limiters", Physics Procedia, Volume 36, 2012, Pages 1248-1253.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212022213>
2. Arsenio, P.; Silva, T.; Vilhena, N.; Pina, J.M.; Pronto, A., "Analysis of Characteristic Hysteresis Loops of Magnetic Shielding Inductive Fault Current Limiters", Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, vol.23, no.3, pp.5601004,5601004, June 2013.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6392214&isnumber=6366257>

1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação apresenta-se organizada em sete capítulos, incluindo o presente, de introdução. Uma vez que cada capítulo começa com uma breve introdução apresentando os temas abordados, faz-se aqui apenas uma breve referência geral a cada capítulo.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: este capítulo faz a revisão bibliográfica da dissertação, introduzindo e contextualizando historicamente o tema da supercondutividade, passando pelas propriedades e fenómenos inerentes aos materiais supercondutores, terminando com os seus diferentes tipos, modelizações e aplicações em geral e na electrotecnia em particular.

Capítulo 3 - Construção do Limitador de Corrente: é dedicado à construção do modelo de limitador de corrente supercondutor indutivo à escala laboratorial, compreendendo todos

os passos seguidos, componentes associados e partes constitutivas, bem como algum dimensionamento efectuado.

Capítulo 4 - Modelização do Limitador de Corrente: aqui são abordados dois métodos de modelização dos limitadores de corrente indutivos, dando maior importância ao baseado na característica magnética do dispositivo. O modelo é obtido experimentalmente através das características das partes constituintes do limitador, e comparado com os resultados de simulação.

Capítulo 5 - Comportamento Dinâmico do Limitador de Corrente: os resultados do comportamento dinâmico do limitador em condições de falha são aqui apresentados e comentados, quer os de simulação, quer os experimentais, para os diversos núcleos de ferro utilizados. É também explicado o aparato experimental implementado, necessário à realização dos ensaios efectuados.

Capítulo 6 - Comparação e Discussão de Resultados: neste capítulo é feito o estudo comparativo dos resultados experimentais obtidos, já que estes dizem respeito a diversas condições de falha e a diferentes núcleos de ferro. O estudo comparativo é feito no sentido de avaliar o desempenho dos limitadores entre si e com o objectivo de validar experimentalmente o método de modelização proposto.

Capítulo 7 - Conclusões e Trabalho Futuro: são aqui tecidas as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido, em jeito de resumo das principais conclusões a retirar. É ainda feita a transposição para perspectivas e trabalhos futuros no sentido de dar continuidade às contribuições originais conseguidas.

2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo faz a revisão bibliográfica desta dissertação, contextualizando o tema abordado na realidade científica actual e apresentando os principais conceitos associados à supercondutividade. Dada a vastidão de temáticas associadas, este capítulo apresenta-se algo extenso apesar dos esforços em contrário, tentando apenas focar os aspectos e conceitos mais relevantes, directamente relacionados com o tema e trabalhos desenvolvidos. A estrutura adoptada na revisão bibliográfica foi:

2.1 - Supercondutividade: Pretende-se fazer uma contextualização histórica da supercondutividade, bem como focar as principais propriedades e fenómenos associados. Seguidamente abordam-se muito brevemente algumas metodologias de modelização, passando depois pelos diferentes tipos de materiais supercondutores e terminando com as diversas aplicabilidades dos mesmos.

2.2 - Limitadores de Corrente de Curto-circuito: Faz-se uma comparação entre soluções convencionais e as supercondutoras na limitação de correntes de curto-circuito, passando pelos locais mais benéficos para introdução de um limitador de corrente supercondutor numa rede de energia. Termina-se com os diferentes tipos de limitadores supercondutores.

2.3 - Limitadores de Corrente Indutivos: Estando directamente relacionados com o tema, apresentam-se mais em detalhe os diferentes tipos de limitadores de corrente indutivos, dando particular importância ao indutivo de blindagem magnética ou transformador e ao de núcleos de ferro saturados ou núcleos polarizados em DC. Abordam-se ainda outros tipos, de menor aplicação.

2.1 Supercondutividade

2.1.1 Introdução e Contexto Histórico

A Supercondutividade foi descoberta pelo físico de baixas temperaturas Heike Kamerlingh Onnes (Figura 2.1), no ano de 1911. Apenas três anos antes, em 1908, Onnes tinha conseguido a liquefacção do hélio a 4,2 K, e reduzindo a pressão alargou assim a gama de temperaturas atingíveis a 1,5 K (Bruyn Ouboter, 1997). Por esta altura, sabia-se que a resistência dos metais tendia a diminuir ao baixar a temperatura, contudo não havia ainda uma teoria globalmente aceite acerca do seu comportamento a baixas temperaturas (Figura 2.2). O trabalho experimental de Onnes no hélio permitiu o estudo alargado das propriedades dos materiais a muito baixas temperaturas, e foi no seu seguimento que a história da supercondutividade começou.

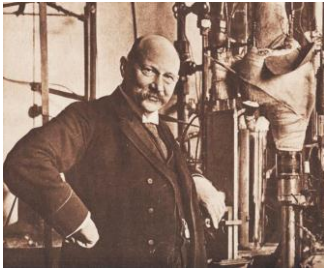
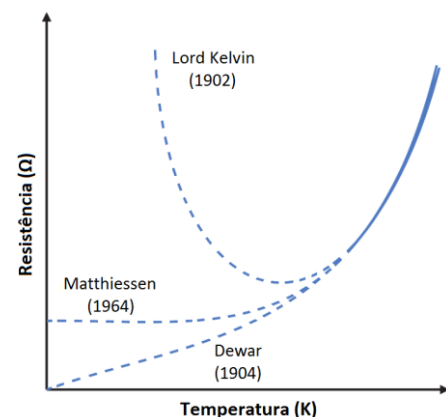


Figura 2.1 – Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) e o liquidificador de hélio no seu laboratório em Leiden, 1910. Prémio Nobel da Física em 1913. Retirado de (Delft, 2008).

Onnes estudava uma amostra de mercúrio com o objectivo de perceber o seu comportamento em função da temperatura, quando se apercebeu que *“a temperaturas muito baixas tais como as que podem ser obtidas pela evaporação do hélio sob reduzida pressão (4,2 K), a resistência, dentro dos limites da precisão experimental, torna-se zero (Figura 2.3). O mercúrio tinha passado a um novo estado, que tendo em conta as suas extraordinárias propriedades eléctricas, pode ser chamado de estado supercondutor”* (Bruyn Ouboter, 1987). Este fenómeno veio então, em parte, desmentir experimentalmente as teorias previamente formuladas por Matthiessen (1864), Lord Kelvin (1902) e Dewar (1904) (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Diferentes teorias sobre o comportamento dos metais em baixas temperaturas e respectivos autores. Adaptado de (Ireson, 2012).



Onnes e os seus colaboradores na Universidade de Leiden, na Holanda, rapidamente chegaram à conclusão que a supercondutividade não estava confinada somente ao mercúrio, uma vez que diminuições súbitas da resistência foram verificadas também em amostras de estanho e chumbo. Atendendo à súbita diminuição da resistência perante um valor de temperatura bem definido, este foi designado como temperatura crítica, T_C .

Rapidamente surgiu a questão de quão pequena seria exactamente a resistência de um material em estado supercondutor. A resposta foi obtida pelos investigadores de Leiden, que fizeram circular uma corrente numa bobina de chumbo no estado supercondutor, com o objectivo de observar o campo magnético por ela induzido. Recorrendo a uma agulha de uma bússola para detectar variações no campo magnético, comprovou-se experimentalmente que não era detectável um decaimento nesta corrente durante as 24 horas em que o material foi mantido abaixo da sua temperatura crítica. Na verdade, a teoria e resultados experimentais posteriores vieram mostrar que a corrente mantinha-se inalterável durante períodos que poderiam ir até aos milhões de anos, justificando assim o prefixo “super” (Ginzburg and Andrûšin, 2004).

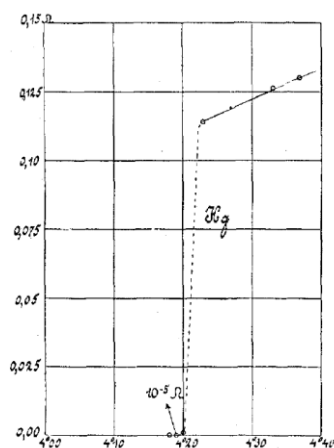


Figura 2.3 – Resistência de uma amostra de mercúrio em função da temperatura absoluta. Gráfico de Kamerlingh Onnes que marcou a descoberta da supercondutividade. Retirado de (Bruyn Ouboter, 1987).

Pouco depois da descoberta da supercondutividade no mercúrio, em 1914 Onnes e a sua equipa descobriram que, mesmo a temperaturas abaixo de T_C , o material perdia o seu estado supercondutor, recuperando a sua resistência normal, quando sujeito a um campo magnético aplicado moderado de algumas centenas de Gauss (dezenas de mT). Esta transição ocorria num valor de campo magnético bem definido, à semelhança do que acontecia com a temperatura, levando assim a definir um valor de campo crítico H_C . O mesmo acontecia a partir de um valor de densidade de corrente J , estabelecendo-se também um valor crítico J_C .

Depois da 1ª Grande Guerra Mundial, a investigação em torno da supercondutividade expandiu-se para além dos laboratórios da Universidade de Leiden, primeiramente para o

Canadá e Alemanha e depois gradualmente por todo o mundo. Contudo, Berlim foi o cenário da segunda grande descoberta no campo da supercondutividade, da qual são responsáveis as experiências levadas a cabo por Meissner e Ochsenfeld (Figura 2.4). Eles haviam tomado uma nova e importante direcção na descoberta de novos materiais supercondutores, ao investigar a ocorrência de supercondutividade nos elementos da tabela periódica. Contudo, só em 1933, trabalhando com elementos puros, descobriram que os supercondutores exibiam outra propriedade tão surpreendente como a de resistência nula: a expulsão imediata de fluxo magnético na transição para a supercondutividade na presença de um campo magnético. Assim, o fluxo magnético que penetrava o supercondutor durante o seu estado normal era completamente repelido na transição para o estado supercondutor. Este fenómeno de diamagnetismo ficou conhecido como efeito de Meissner e será alvo de mais atenção adiante neste capítulo.



Figura 2.4 – Walther Meissner (1882 - 1974) à esquerda e Robert Ochsenfeld (1901 - 1993) à direita (fonte: <http://www.ptb.de/cms/en/ib/geschichte-ib.html>).

Visto que o diamagnetismo e a condutividade perfeita num supercondutor eram fenómenos independentes, a investigação avançava no sentido de formular teorias explicativas destes fenómenos. A primeira teoria mais relevante foi introduzida em 1935 pelos irmãos Fritz e Heinz London (Figura 2.5), que defendiam haver uma outra relação matemática a ser usada no lugar da Lei de Ohm, para descrever os supercondutores. Esta relação, descrita pelas equações de London, explicava o fenómeno do diamagnetismo de Meissner-Ochsenfeld e a resistividade nula de Onnes como duas manifestações distintas do mesmo fenómeno que é a supercondutividade.

Figura 2.5 – Fritz London (1900 – 1954) e Heinz London (1907 – 1970) (fonte: <http://www.dipity.com/peppeliberti/The-history-of-superconductivity/>).



O grande avanço ao nível do entendimento teórico da supercondutividade surgiu 46 anos depois da sua descoberta, em 1957, com a introdução da primeira teoria microscópica unificada e globalmente aceite como base de todo o fenómeno da supercondutividade. Os seus autores, John Bardeen, Leon Neil Cooper e John Robert Schrieffer (Figura 2.6), de nacionalidade americana, foram premiados com o Nobel da Física em 1972 pela sua teoria, conhecida como “teoria BCS”, cujo nome deriva das iniciais dos seus apelidos. A teoria BCS introduz que numa atracção entre electrões, é envolvida menos energia se estes se ligarem em pares, em vez de circularem isolados. Assim, na transição para o estado supercondutor, os electrões ligam-se formando pares estáveis, denominados “pares de Cooper”.



Figura 2.6 - John Bardeen, Leon Neil Cooper e John Robert Schrieffer em 1972, ano em que foram galardoados com o Nobel da Física (fonte: <http://www.nytimes.com/2008/01/08/science/08super.html>).

Por esta altura, Alexei Abrikosov (Figura 2.7), de nacionalidade russa, fez a distinção entre os supercondutores convencionais, ou de tipo I, tipicamente metais puros, e os de tipo II, geralmente ligas ou compostos metálicos. Nestes últimos, a transição de estado é mais lenta e a penetração do fluxo magnético ocorre em tubos de fluxo cujo núcleo está no estado normal, chamados vórtices, devido à forma como a corrente eléctrica circula à sua volta (Figura 2.8), originando assim um estado misto durante a transição.

Figura 2.7 – Alexei Alexeyevich Abrikosov, Prémio Nobel da Física em 2003. Retirado de (Blundell, 2009).

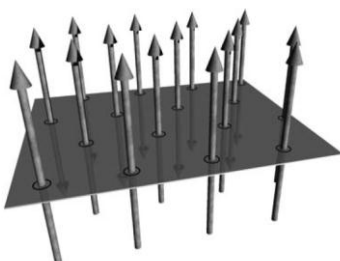


Figura 2.8 – Diagrama esquemático dos vórtices introduzidos pela teoria de Abrikosov. Retirado de (Blundell, 2009).

Um outro avanço significativo na teoria da supercondutividade surgiu em 1962 por um estudante americano, Brian D. Josephson (Figura 2.9). Ele previu que uma corrente fluiria entre dois materiais supercondutores, mesmo que eles estejam separados uma fina barreira de material não supercondutor ou isolante. A sua previsão foi mais tarde confirmada experimentalmente, sendo co-galardoado com o Nobel da Física em 1973. Este efeito de “túnel” é hoje conhecido como “efeito de Josephson”.



Figura 2.9 – Brian David Josephson, co-galardoado com o Nobel da Física em 1973 (fonte: <http://www.dipity.com/peppeliberti/The-history-of-superconductivity/>).

A década de 80 foi ímpar no avanço da supercondutividade. Em 1980 surgiu o primeiro supercondutor sintético, conseguido pelo dinamarquês Klaus Bechgaard da Universidade de Copenhaga. Apesar de ter de ser sujeito a temperaturas de 1,2 K e alta pressão para passar ao estado supercondutor, ficou comprovada a possibilidade de criar novos compostos moleculares orgânicos baseados em carbono para novos materiais supercondutores, como aliás já tinha sido sugerido por Bill Little da Universidade de Stanford em 1964.

Ainda nos anos 80, mais precisamente em 1986, surgiu mais um marco importantíssimo na história da supercondutividade, cujos responsáveis são Alex Müller e Georg Bednorz (Figura 2.10), investigadores no IBM Research Laboratory em Rüschlikon, Suíça. Eles criaram um composto cerâmico frágil capaz de transitar de estado à mais alta temperatura até então registada: 30 K. Dado o carácter normalmente isolante dos compostos cerâmicos, estes não haviam sido considerados anteriormente como potenciais candidatos a supercondutores. A descoberta destes materiais, devido à sua elevada temperatura de transição quando comparada com a dos conhecidos até então, introduziu uma nova noção, a de materiais Supercondutores de Alta Temperatura (SAT), o que deu aos seus autores o galardão de prémio Nobel da Física no ano seguinte.

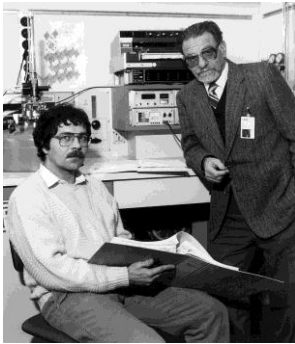
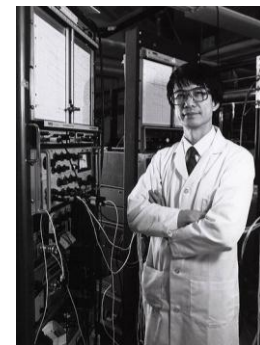


Figura 2.10 - Da esquerda para a direita, Johannes Georg Bednorz e Karl Alexander Müller, investigadores IBM e detentores do Prémio Nobel da Física em 1987 (fonte: http://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/5578970567/sizes/o/in/set-72157626190634967/).

O feito científico conseguido por Müller e Bednorz espoletou um reavivar das investigações no campo da supercondutividade, e por todo o mundo “cozinhavam-se” cerâmicos nas mais diversas combinações de compostos, em busca de materiais com temperaturas críticas mais elevadas. Em 1987 uma equipa de investigadores liderada por Paul Chu (Figura 2.11) e Maw-Kuen Wu, respectivamente das Universidades de Houston e Alabama, descobriram um novo material SAT, hoje vulgarmente conhecido com YBCO, cuja T_C é de 93 K. Novos compostos materiais foram sendo descobertos e a temperatura crítica foi aumentado, estando o recorde actualmente no composto cerâmico $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ com uma temperatura crítica de 135 K à pressão ambiente, que sujeito a altas pressões exhibe uma T_C de 164 K (Buckel and Kleiner, 2004). A Figura 2.12 mostra esta evolução ao longo dos anos.

Figura 2.11 - Paul Ching-Wu Chu (fonte: <http://www.dipity.com/peppeliberti/The-history-of-superconductivity/>).



Estavam então, pela primeira vez, disponíveis materiais supercondutores de temperatura crítica superior à do azoto líquido (77 K). A facilidade, abundância e baixo custo de obtenção deste último, aliadas à evolução tecnológica dos sistemas de refrigeração e redução dos seus custos, abrem o leque de potenciais aplicações tecnológicas da supercondutividade nos campos da energia, microelectrónica e outras aplicações que se vão tornando, a seu tempo, cada vez mais viáveis.

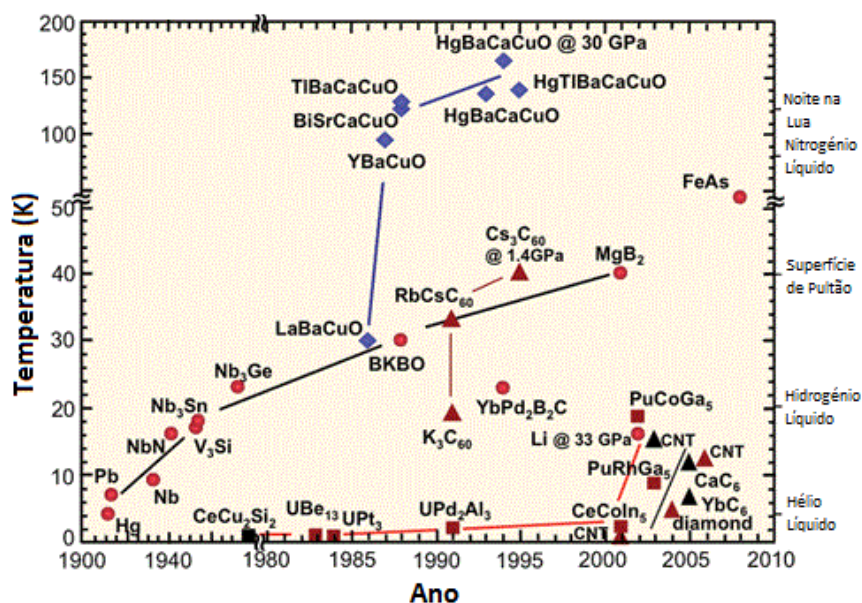


Figura 2.12 – Evolução da temperatura crítica de transição dos supercondutores, desde a sua descoberta até aos dias de hoje. Adaptado de (<http://www.ccas-eb.org/superconductivity/#image1>).

2.1.2 Propriedades e Fenómenos

Na secção anterior foram descritas as principais propriedades descobertas ao longo da história da supercondutividade. Nesta secção será dada ênfase a estes fenómenos, nomeadamente à resistividade nula e ao efeito de Meissner, visto que a grande maioria das aplicações tira partido de pelo menos uma destas propriedades. O efeito de Josephson não se mostra relevante para o conteúdo desta dissertação, pelo que não será alvo de mais atenção.

2.1.2.1 Resistividade Nula

A primeira característica que esteve na base da descoberta da supercondutividade foi a resistividade nula ($\rho = 0$) ou condutividade perfeita ($\sigma = \infty$), abaixo de uma certa temperatura, previamente denominada T_c . Não é correcto inferir que a resistividade de um material é nula simplesmente por não ser detectada resistência nos aparelhos de medida, são necessários métodos mais sensíveis para se poder tirar esta conclusão. O método mais correcto para o efeito é induzir uma corrente num anel supercondutor e observar a sua variação no tempo. O anel é arrefecido na presença de campo magnético e, uma vez no estado supercondutor, o campo é removido. A variação de fluxo magnético ϕ induz pela Lei de Faraday uma força electromotriz ao longo do anel, que por sua vez cria a corrente. A variação na corrente pode ser observada através da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} por ela criada ao circular no anel, através de uma sonda de Hall, por exemplo (Figura 2.13).

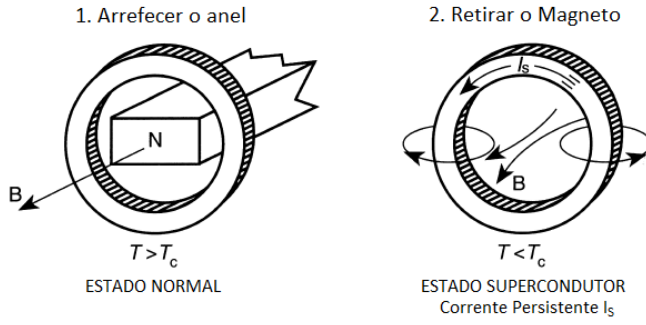


Figura 2.13 – Criação de uma corrente persistente num anel supercondutor para provar experimentalmente a sua resistividade perfeita. Adaptado de (Buckel and Kleiner, 2004).

Se a resistividade for realmente nula, esta corrente I_s irá circular como uma “corrente persistente” enquanto o anel for mantido no seu estado supercondutor. Contudo, se houver uma resistência finita R , a energia magnética armazenada no anel é convertida gradualmente em calor por efeito de Joule e a corrente diminui.

A energia magnética armazenada no anel, percorrido pela corrente I é dada por:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2.1)$$

A conservação da energia leva a que variação temporal da energia magnética seja compensada pela potência dissipada por efeito de Joule RI^2 na resistência do anel. Logo, tem-se que:

$$\frac{dW_{mag}}{dt} + RI^2 = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \right) = -RI^2 \quad (2.3)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{R}{L} I \quad (2.4)$$

A solução de (2.4) descreve então o decaimento da corrente no tempo:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.5)$$

Na situação anterior, I_0 é o valor de corrente induzida no supercondutor no instante $t = 0$, $I(t)$ é a corrente no instante t , R a resistência eléctrica e L o coeficiente de auto-indução, que depende apenas da geometria do anel e cuja constante de tempo é $\tau = \frac{R}{L}$. Tal como já foi referido, esta experiência foi realizada e não foi detectado decaimento na corrente durante 24 horas, tempo que aumentou bastante em experiências posteriores. Considerando uma corrente persistente de um ano, ter-se-ia $\tau = 3 \times 10^7 s$ e uma resistividade de $\rho = 2,5 \times 10^{-25} \Omega m$ (Fossheim and Sudboe, 2004). Estes valores são cerca de 17 ordens de grandeza abaixo da resistividade do cobre ($\rho = 1,72 \times 10^{-8} \Omega m$), o que mostra que, na prática, é legítimo considerar-se $\rho = 0$ ou $\sigma = \infty$.

2.1.2.2 Efeito de Meissner: Diamagnetismo Perfeito

Durante algum tempo pensou-se que a resistividade nula era a única característica da supercondutividade, no entanto, existe um outro fenómeno, o efeito de Meissner. Este consiste no facto de um campo magnético aplicado acima de T_C ser repellido do interior do supercondutor quando este é arrefecido abaixo da temperatura crítica, conduzindo a $\mathbf{B} = 0$ no seu interior. Escrevendo a forma mais geral da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} de um corpo no estado supercondutor vem então:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = 0 \quad (2.6)$$

Onde \mathbf{M} é a magnetização, \mathbf{H} o campo magnético e μ_0 a constante magnética ou permeabilidade magnética no vácuo. Significa isto que dentro do supercondutor:

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H} \quad (2.7)$$

A equação (2.7) conduz a que a susceptibilidade magnética κ de um material supercondutor apresente o valor ideal do diamagnetismo perfeito:

$$\kappa = \frac{d\mathbf{M}}{d\mathbf{H}} = -1 \quad (2.8)$$

Este fenómeno é explicado por correntes de blindagem que se geram na superfície do material, que provocam no supercondutor um campo magnético que se soma ao campo

aplicado. O resultado desta soma não só provoca $B = 0$ no interior da amostra como ainda intensifica o campo na periferia (Figura 2.14). Isto explica o fenómeno da levitação magnética, onde um supercondutor é capaz de fazer levitar sobre si um magneto a uma altura de equilíbrio entre o peso do último e a força repulsiva gerada pelo campo magnético (Figura 2.15). Note-se no entanto que o diamagnetismo perfeito só se faz sentir dentro de uma certa gama de densidade de fluxo e temperatura, como será visto mais adiante.

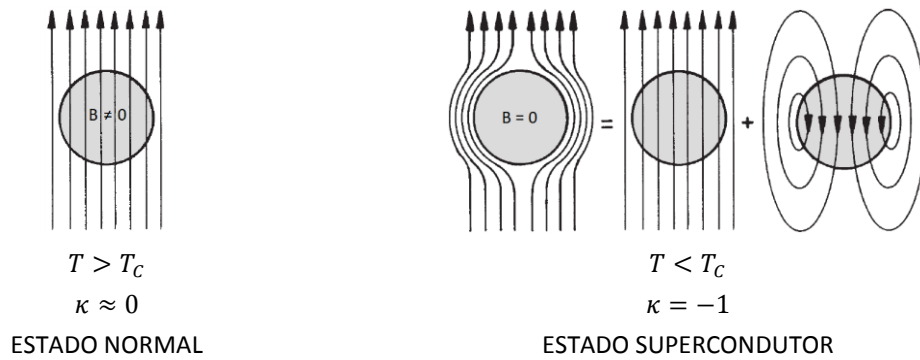
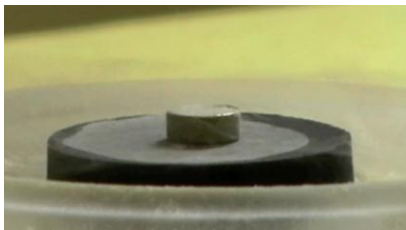
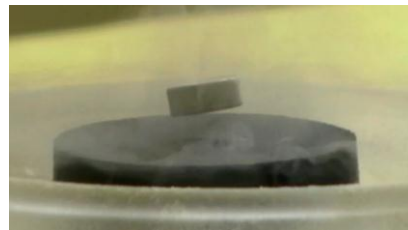


Figura 2.14 – Efeito de Meissner num supercondutor. Para $T < T_c$, a soma do campo magnético aplicado com o campo magnético gerado pelas correntes de blindagem resulta numa densidade de fluxo magnético nula dentro do supercondutor. Adaptado de (Cardwell and Ginley, 2003).



a) Posição inicial, $T > T_c$



b) Posição de equilíbrio, $T < T_c$

Figura 2.15 – Levitação magnética demonstrativa do efeito de Meissner na presença de um campo magnético aplicado (fonte: <http://physics.ucsd.edu/~jorge/meissner/meissner4.mov>).

A resistividade nula não implica a exclusão do fluxo do interior do supercondutor. Não é suficiente que haja resistividade nula para se estar na presença de um supercondutor, pois um material possuindo apenas esta característica seria um condutor perfeito, cujo comportamento termodinâmico na presença de campos magnéticos aplicados é totalmente diferente. Sendo nulo o campo eléctrico E de um condutor perfeito, então a lei de Faraday obriga a que o fluxo magnético ϕ que atravessa uma qualquer superfície fechada delineada por um caminho fechado l seja constante (2.9).

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (2.9)$$

Assim, o estado final de um condutor perfeito depende do historial térmico e magnético a que foi submetido, ao contrário de um supercondutor, cuja exclusão do fluxo magnético associada ao efeito de Meissner assegura que o estado final depende apenas das variáveis termodinâmicas T e \mathbf{B} aplicado (Figura 2.16). Isto significa que o efeito de Meissner é um fenómeno termodinâmico reversível independente, distinto e mais importante na caracterização de um supercondutor do que a resistividade nula, apesar de esta última ser a única sugerida pelo nome “supercondutividade”.

2.1.2.3 Superfície Crítica

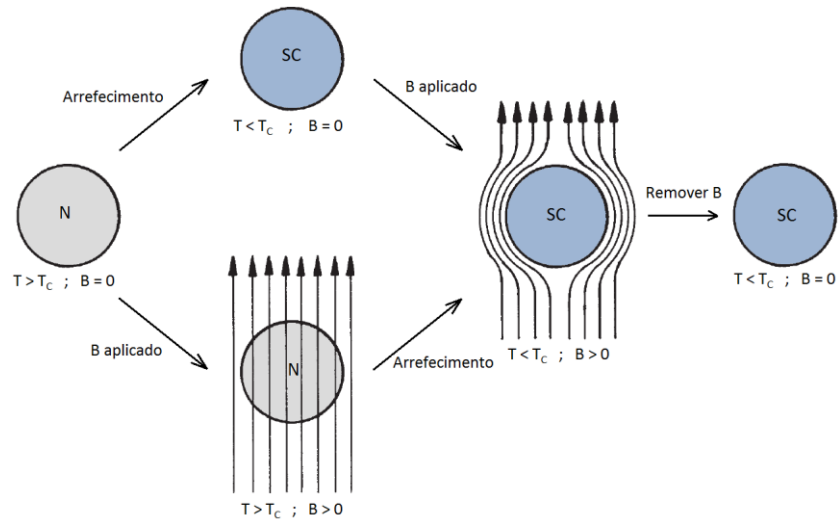
Como já foi referido, o estado supercondutor não é permanente, podendo ser destruído dependendo das variáveis termodinâmicas externas. A principal destas variáveis é, naturalmente, a temperatura crítica T_C , acima da qual o estado normal é restituído. Também já referido, o mesmo acontece com um campo magnético acima de um dado limite, H_C . Segundo (Charles P. Poole, Farach et al., 2007), este último varia com a temperatura da seguinte forma (Figura 2.17).

$$H_C(T) = H_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

Existe também uma densidade de corrente crítica J_C que origina H_C na superfície do supercondutor, destruindo-lhe este estado, dado que ambos se relacionam como mostra (2.11), (Charles P. Poole, Farach et al., 2007).

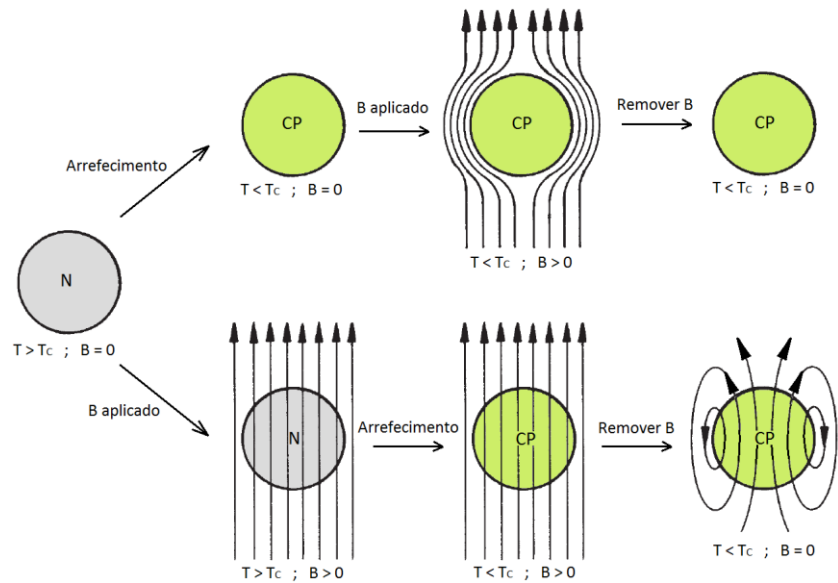
$$H_C(T) = \mu_r \cdot \lambda(T) \cdot J_C(T) \quad (2.11)$$

a) Supercondutor (SC)



Arrefecido o material na presença ou não de campo magnético, este é sempre expelido do seu interior.

b) Condutor Perfeito (CP)



Arrefecido o material na presença de campo magnético, este é conservado, mesmo depois de removido o campo externo aplicado.

Figura 2.16 – Comparação entre os comportamentos termodinâmicos de um supercondutor e um condutor perfeito na presença de campos de indução magnética aplicados.

Na equação anterior, μ_r é a constante magnética relativa e λ a espessura da camada superficial do supercondutor onde circulam as correntes, chamada profundidade de penetração. Segundo (Charles P. Poole, Farach et al., 2007) também esta última varia com a temperatura.

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

A substituição das equações anteriores permite concluir acerca da variação de J_C com a temperatura (Figura 2.18):

$$J_C(T) = J_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^4 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

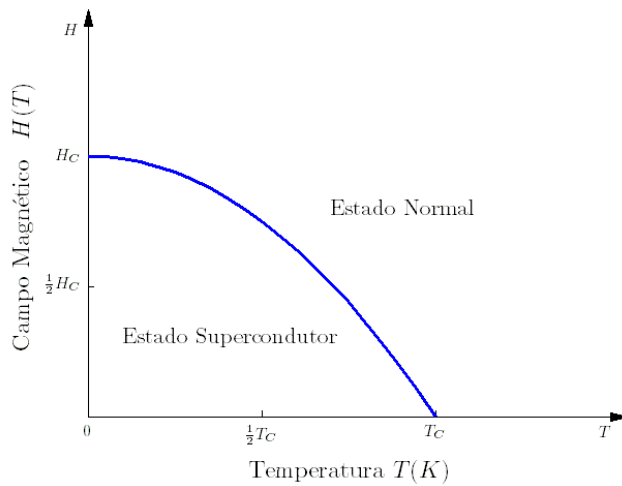
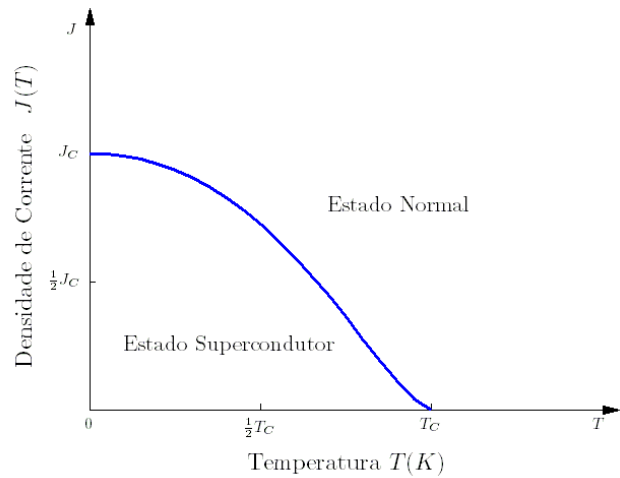


Figura 2.17 – Dependência do campo magnético crítico com a temperatura, correspondente à expressão (2.10), para supercondutores do Tipo I.

Figura 2.18 - Dependência da densidade de corrente crítica com a temperatura, correspondente à expressão (2.13), para supercondutores do Tipo I.



As dependências anteriores com a temperatura permitem descrever uma superfície no espaço tridimensional formada pelas variáveis H , J e T . Esta constitui a fronteira entre o estado normal e supercondutor de um material, sendo que este último perde para o primeiro em qualquer ponto do exterior da superfície. Por esta razão ela toma o nome de superfície crítica, sendo também conhecida por espaço de fases ou diagrama TJH (Figura 2.19).

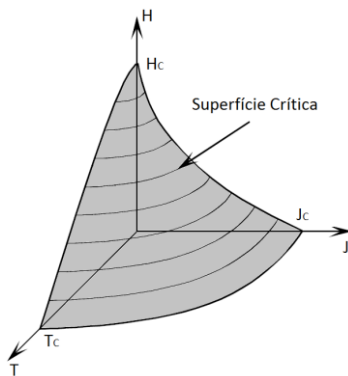


Figura 2.19 – Superfície crítica de um supercondutor. A região de operação do material neste estado é no interior do volume sombreado. Adaptado de (Lee, 2002).

2.1.3 Tipos de Supercondutores

Até 1960 os supercondutores eram interessantes do ponto de vista da física mas não tinham aplicações práticas dado que não suportavam densidades de corrente significativas. Só com a descoberta de um novo tipo de supercondutores estas aplicações começaram a surgir. As duas classes foram definidas como supercondutores de Tipo I e Tipo II e a diferença tem como base as suas propriedades magnéticas e de densidade de corrente. As suas diferenças são tão dramáticas que a indústria baseia-se principalmente nos de Tipo II, por se manterem supercondutores em campos e densidades de corrente bem mais intensas que os do Tipo I, cujas aplicações são muito restritas. Por esta razão, também a atenção será mais focada nos de tipo II, em detrimento dos primeiros.

Ginsburg e Landau introduziram na sua teoria a noção de comprimento de coerência ξ , que pode ser entendida como a distância necessária à propagação dos fenómenos de interação entre os pares de Cooper segundo a teoria BCS, e definiram o parâmetro de Ginsburg-Landau $\kappa_{GL} = \lambda/\xi$, que permite distinguir o tipo do supercondutor (Fossheim and Sudboe, 2004):

- Tipo I: $\kappa_{GL} < 1/\sqrt{2}$
- Tipo II: $\kappa_{GL} > 1/\sqrt{2}$

2.1.3.1 Tipo I

Sendo a primeira geração de supercondutores, estes são geralmente materiais puros e apresentam um valor de T_C bastante baixo (inferior a 30 K), sendo por isso normalmente associados ao título de Supercondutores de Baixa Temperatura (SBT) ou LTS do inglês “*Low Temperature Superconductors*”¹. Tal como foi visto na secção 2.1.2, num supercondutor do Tipo I, a corrente crítica é somente uma consequência do campo magnético crítico. Nestes, H_C é baixo e portanto também o é J_C , daí o seu reduzido interesse em aplicações práticas. Abaixo de H_C , existe um cancelamento do campo magnético \mathbf{H} por oposição de uma magnetização \mathbf{M} , resultando em $\mathbf{B} = 0$ dentro do supercondutor (efeito de Meissner). Acima de H_C a supercondutividade perde-se numa transição abrupta (Figura 2.20 e Figura 2.21). Assim, enquanto supercondutor, não há qualquer penetração de fluxo no interior do material. A Tabela 2.1 faz referência a alguns exemplos de materiais deste tipo.

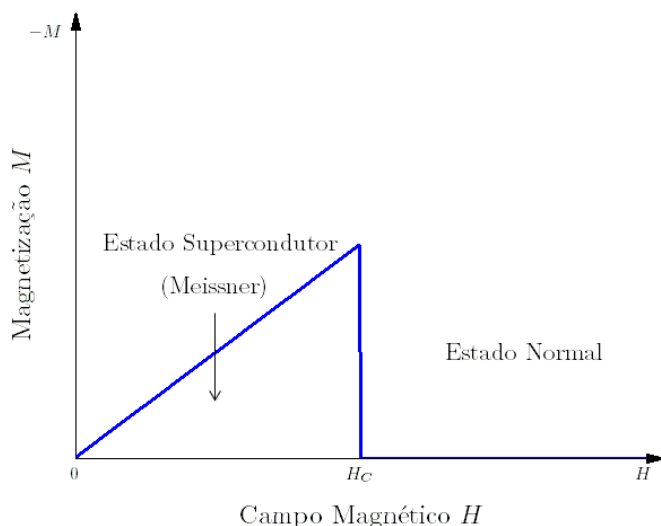


Figura 2.20 – Curva da Magnetização em função do campo magnético na transição de estado de um supercondutor do Tipo I. O declive da recta é unitário.

¹ É frequente associar este título a materiais cuja temperatura crítica está abaixo do ponto de ebulição do azoto líquido (77 K), nomeadamente quando se tratam de aplicações de supercondutividade conseguidas por arrefecimento via azoto líquido.

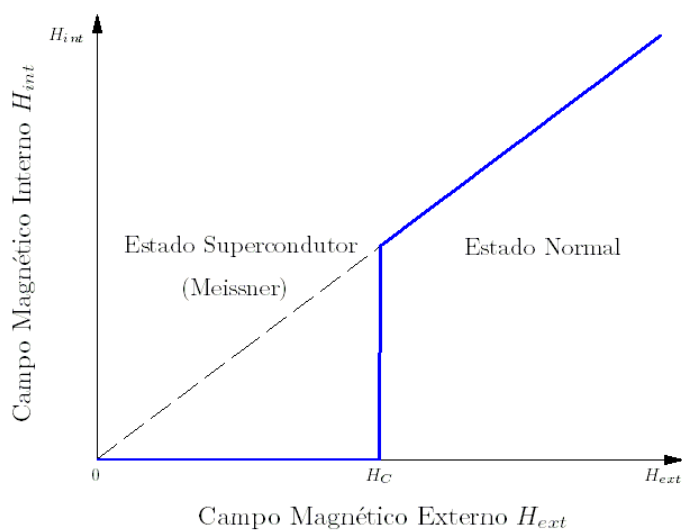


Figura 2.21 – Campos magnéticos interno e externo na transição de estado de um supercondutor do Tipo I. O declive da recta é unitário.

Tabela 2.1 – Alguns exemplos de materiais supercondutores do Tipo I e respectivos valores de temperatura e campo magnético críticos (fonte: http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_4.html).

<i>Elemento</i>	<i>T_C (K)</i>	<i>H_C(0) (mT)</i>
Alumínio	1,75	10,5
Chumbo	7,2	80,3
Estanho	3,72	30,5
Gálio	1,083	5,8
Lantânio	4,88	80
Mercúrio	4,154	41,1
Tálio	2,38	17,8

2.1.3.2 Tipo II

A segunda geração de supercondutores, geralmente compostos cerâmicos e ligas metálicas, apresentam valores de T_C bastante mais elevados (superiores a 30 K). Os compostos cerâmicos são capazes de apresentar temperaturas críticas mais elevadas, sendo por isso frequentemente associados ao título de Supercondutores de Alta Temperatura (SAT) ou HTS do inglês “*High Temperature Superconductors*”. Nos supercondutores do tipo II existem dois campos magnéticos críticos, o inferior, H_{C1} , e o superior, H_{C2} . Para $H < H_{C1}$ verifica-se efeito de Meissner e o material comporta-se como se fosse do Tipo I, opondo-se à penetração de

fluxo. Intensificando H , o fluxo magnético vai progressivamente penetrando o material até H_{C2} , situação em que a penetração é total e a supercondutividade é destruída. Para $H_{C1} \leq H \leq H_{C2}$ o material fica no chamado *estado misto* ou *estado vórtice*, onde o cancelamento de H deixa de ser perfeito e M começa a diminuir com a penetração de fluxo (Figura 2.22).

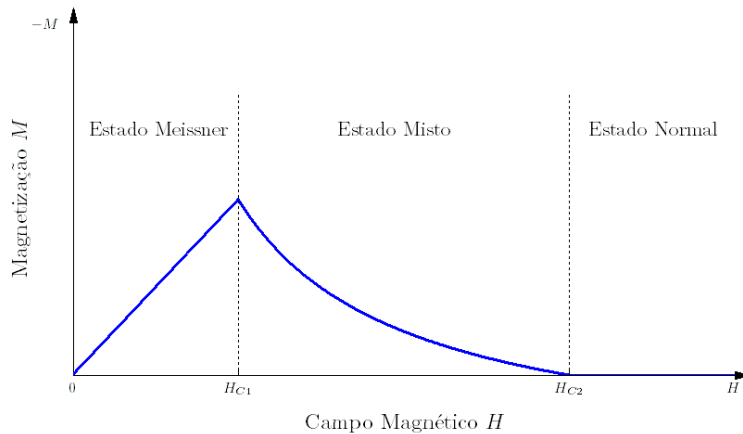
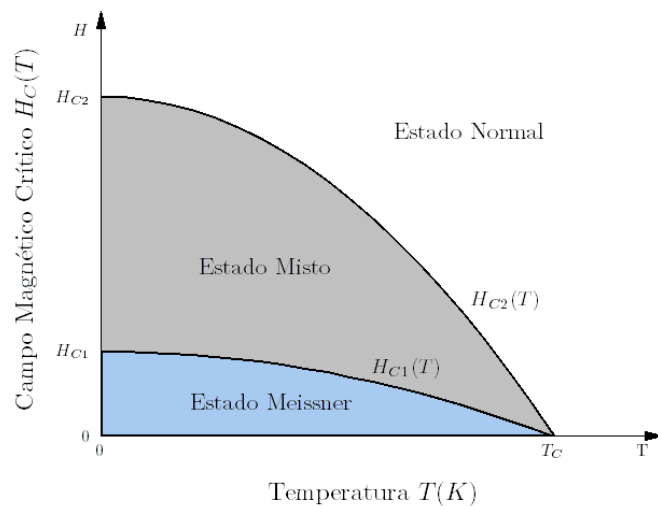


Figura 2.22 – Curva da magnetização em função do campo magnético aplicado na transição de um supercondutor ideal do tipo II. O declive da recta é unitário.

Contrastando com a Figura 2.17 correspondente ao Tipo I, o espaço $H - T$ de um supercondutor do Tipo II apresenta agora uma área correspondente ao estado misto (Figura 2.23). A teoria explicativa deste novo estado foi apresentada pela primeira vez em 1957 pelo seu autor, A. Abrikosov, confirmada posteriormente por Ginsburg e Landau. No estado misto, apesar de já não haver diamagnetismo perfeito (efeito de Meissner) devido à penetração parcial de campo, a supercondutividade é preservada (Figura 2.24).

Figura 2.23 – Espaço H-T num supercondutor do Tipo II ilustrando as áreas correspondentes a cada um dos três estados possíveis.



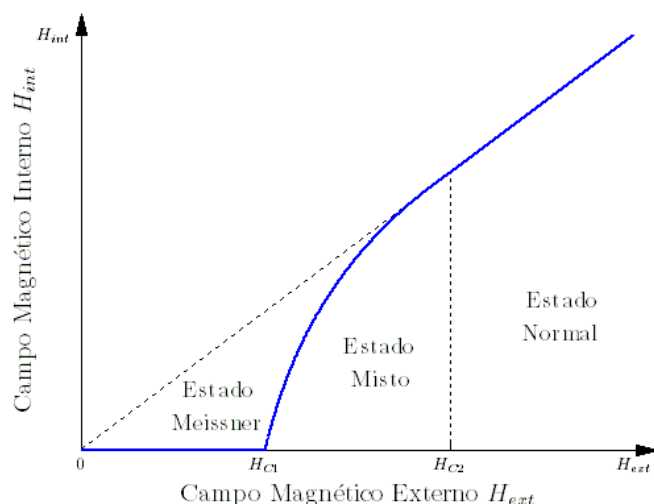


Figura 2.24 - Campos magnéticos interno e externo na transição de estado de um supercondutor do Tipo II.

A penetração de campo magnético é feita através de canais de fluxo chamados vórtices, que se repelem entre eles distribuindo-se de forma triangular e ao qual estão associadas correntes de circulação que actuam como correntes de blindagem. À medida que o campo aumenta, o número de vórtices vai aumentando e a distância entre eles vai diminuindo, onde parte do material está no estado supercondutor, e o centro dos vórtices no estado normal. Tal vai acontecendo até a força repulsiva entre eles tornar energeticamente inviável a formação de novos vórtices, o que acontece para $H = H_{C2}$. Nesta altura, o campo magnético comprime a estrutura de vórtices e eles fluem juntos, destruindo a supercondutividade e tornando todo o material no estado normal. Os vórtices são sempre paralelos ao campo magnético aplicado mas as suas dimensões são bem determinadas, não dependendo de factores ou variáveis externas (Figura 2.25 e Figura 2.26).

Este mecanismo de penetração de fluxo leva ainda a um outro fenómeno que permite a utilização destes materiais como magnetos permanentes. A existência de impurezas ou defeitos no material, que por vezes são introduzidos intencionalmente durante o seu processo de fabrico, faz com que os vórtices de fluxo que penetram o material durante o estado misto fiquem presos, ou ancorados, nesses locais. Este fenómeno, denominado por *Ancoramento de Fluxo*, em inglês "*Flux Pinning*", faz com que o fluxo magnético permaneça ancorado no material, mesmo depois da extinção do campo magnético aplicado que lhe deu origem. Assim, o material torna-se num *magneto de fluxo residual*, em inglês "*Trapped-Flux Magnet*", que não é mais do que um "magneto supercondutor permanente". Estes materiais sintetizados à base de terras raras são capazes de ancorar densidades de fluxo magnético superiores a 2 T a 77 K e superiores a 10 T abaixo dos 50 K. O ancoramento de fluxo acontece seja o campo externo aplicado antes ou depois do arrefecimento, contudo, é mais eficaz no primeiro caso.

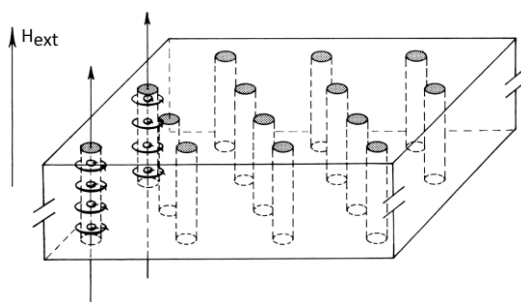
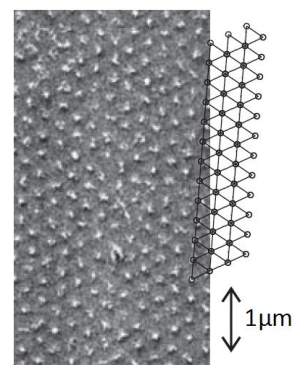


Figura 2.25 - Diagrama esquemático da rede de vórtices no estado misto num supercondutor do Tipo II. Em torno dos vórtices circulam as correntes de blindagem. Adaptada de (Buckel and Kleiner, 2004).

Figura 2.26 – Vista microscópica da rede de vórtices num material supercondutor do Tipo II, recorrendo a uma técnica de contraste magnético. Um esboço da estrutura triangular da rede é mostrado à direita. Retirado de (Blundell, 2009).



Na Tabela 2.2 dão-se alguns exemplos de materiais do Tipo II. Note-se que os compostos cerâmicos sintéticos, assinalados com “*”, são os SATs comercialmente mais comuns, sendo actualmente fabricados nas mais diversas formas, como por exemplo anéis, discos, tubos, barras, fita, etc. (Figura 2.27), e usados nas mais diversas aplicações.

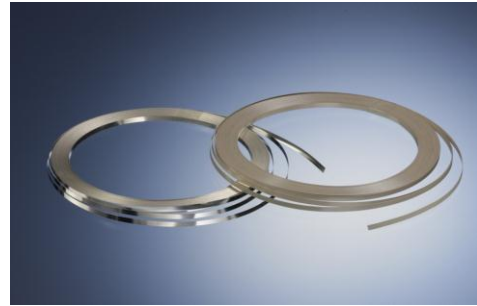
Tabela 2.2 - Alguns exemplos de materiais supercondutores do Tipo II e respectivos valores de temperatura e campos magnéticos críticos (fonte: http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_4.html).

<i>Elemento/Material</i>	<i>T_c (K)</i>	<i>B_{c1}(0) (mT)</i>	<i>B_{c2}(0) (mT)</i>
Nióbio	9,25	173	405
Tântalo	4,47	45	200
Tecnécio	7,8	116	312
Vanádio	5,4	26	268
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ *	92	—	107
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ *	93	—	140

* Composto cerâmico sintético.



a) Supercondutor maciços.



b) Fita Supercondutora 2G.

Figura 2.27 – Materiais supercondutores de alta temperatura nas suas diferentes formas e geometrias (fonte: <http://nanopars.org/page/Super-Conductor.aspx> e <http://www.bruker-est.com/hts-tapes.html>).

2.1.4 Modelização de Supercondutores

A formulação de modelos capazes de descrever o comportamento dos materiais supercondutores, particularmente os SAT, torna-se importante para modelar e simular o comportamento dinâmico de dispositivos que incluem este tipo de materiais. Ao longo da história dos materiais supercondutores foram sendo formulados vários modelos, uns mais complexos que outros, pelo que este é um assunto vasto e tanto menos trivial quanto mais profundo for o seu estudo. Assim, este é abordado de forma muito superficial, tocando apenas nos principais modelos e no que é estritamente necessário para a compreensão dos trabalhos desenvolvidos no âmbito desta dissertação.

2.1.4.1 Modelos de estado crítico

Os modelos de estado crítico têm a particularidade de a densidade de corrente assumir apenas um de dois valores possíveis, ou nula, ou o da corrente crítica. Começa-se por abordar um dos modelos mais conhecidos, o **modelo de Bean** (Bean, 1962, Bean, 1964), no qual a densidade de corrente no supercondutor é independente da densidade de fluxo:

$$|J| = cte. = J_c \quad (2.14)$$

Na realidade, tal não acontece mas esta é uma simplificação que em certas aplicações reproduz resultados bastante aceitáveis, como é exemplo o cálculo de perdas AC em supercondutores de alta temperatura.

Outros modelos foram formulados, considerando já a dependência existente entre a densidade de fluxo e a densidade de corrente crítica. O **modelo de Kim** (Kim, Hempstead et al., 1962, Kim, Hempstead et al., 1963) é, entre eles, um dos mais conhecidos e é descrito de acordo com a seguinte expressão para a densidade de corrente crítica, sendo B_i uma constante obtida experimentalmente:

$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{1 + \frac{B}{B_i}} \quad (2.15)$$

Existem muitos outros modelos de estado, como é exemplo o exponencial, linear, de potência, generalizado, entre outros. Contudo, dado não serem relevantes no contexto do trabalho desenvolvido, não serão apresentados.

2.1.4.2 Lei da potência E-J

Este modelo surge no sentido de colmatar o carácter simplista dos modelos de estado crítico, nos quais se considera que as correntes no elemento SAT apresentam sempre o seu valor crítico. Tal como referido, isto não acontece, já que a transição de estado nos SAT não se dá de forma abrupta. Assim, a **lei da potência E-J**, tal como o nome indica, relaciona o campo eléctrico E com a densidade de corrente J no supercondutor, sendo actualmente um dos métodos mais utilizados na modelização de SATs (Brandt, 1998):

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.16)$$

Ou vectorialmente dada por (Stavrev, Grilli et al., 2002):

$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^{n-1} \frac{\mathbf{J}}{J_c} \quad (2.17)$$

Onde E_c é o valor do campo eléctrico para o qual é atingida a densidade de corrente crítica J_c e é geralmente utilizado o critério de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, $T = 77 \text{ K}$, $J_c = 1300 \text{ A}/\text{cm}^2$

(Elschner, Breuer et al., 2001). O parâmetro n é responsável por determinar a forma da curva, sendo que $n = 1$ corresponde à lei de Ohm comum, i.e., um andamento linear, e $n = \infty$ ao modelo de Bean, com uma curva representativa de uma transição abrupta. A influência do parâmetro n nas curvas é mostrada na Figura 2.28.

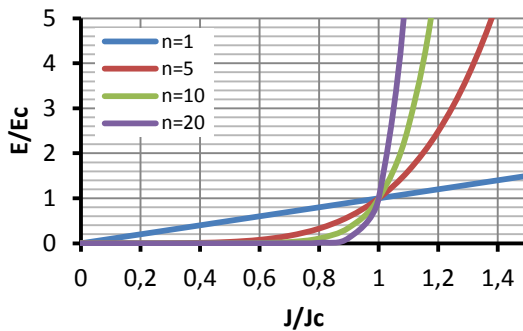


Figura 2.28 – Influência do parâmetro n na lei da potência E-J.

2.1.5 Aplicações

O custo é um dos factores mais importantes para uma aplicação entrar no mercado. Contudo, a evolução, maturação e processos de fabricação em massa dos materiais SAT tem levado a relação custo/desempenho a diminuir ao longo dos anos (Figura 2.29), o que veio abrir o leque de aplicações práticas nomeadamente em sistemas de potência. Os primeiros benefícios económicos desta evolução começaram por surgir na redução da potência necessária nos sistemas de arrefecimento, sendo que aplicações específicas que requeiram campos de indução magnética superiores a 20 T (ou até menos, na prática) encontram a supercondutividade como a única potencial alternativa possível (Gamble, Snitchier et al., 1996). Os benefícios obtidos no uso de supercondutores devem sobrepor-se aos custos associados na sua introdução, sendo as principais aplicações da supercondutividade de alta temperatura abordadas em mais detalhe:

- Máquinas eléctricas rotativas.
- Cabos de Energia.
- Armazenamento de energia (SMES)
- Transformadores e Limitadores de Corrente.

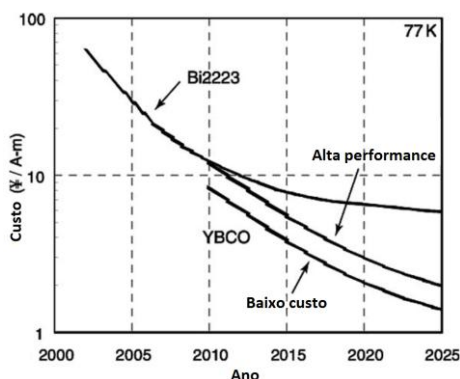


Figura 2.29 – Projeções da relação Custo/Desempenho dos SATs a 77 K. Adaptado de (Tsukamoto, 2005).

Para além destas, existem diversas outras, que apesar de não serem alvo de mais atenção, são dignas de ser referidas. O uso de **chumaceiras supercondutoras** em equipamentos rotativos como os volantes de inércia, em inglês “*flywheels*”, ou até motores e geradores, permite minimizar as perdas associadas ao atrito por contacto das chumaceiras convencionais onde assenta o veio de rotação. **Equipamentos e projectos de investigação científica** frequentemente usam SATs, como é exemplo o acelerador de partículas do CERN que usou, entre outros, um anel de 27 km para operar a 8,65 T ou o projecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) no qual é prevista a utilização de cerca de 1200 toneladas de material supercondutor (Montgomery, 1997).

Outro mercado possível inclui as **aplicações militares e espaciais** como a detecção e limpeza de minas explosivas, transmissão de energia para o espaço ou sistemas electromagnéticos de lançamento terra-órbita (Gamble, Snitchier et al., 1996). As **ciências médicas** também recorrem a este tipo de materiais, nomeadamente em equipamentos de imagem por ressonância magnética e novas tecnologias de radiografia e biomagnetismo. **Processos industriais** como a separação magnética e até a **microelectrónica das telecomunicações** são potenciais aplicações de materiais supercondutores, não esquecendo os **SQUIDS** (*Superconducting QUantum Interference Devices*), os mais sensíveis sensores magnéticos com diversas aplicabilidades (magnetoencefalografia, mineralogia, radares, etc.) (Montgomery, 1997).

É importante referir que, a fim de aumentar a aplicabilidade prática destes materiais, é tão importante investir no desenvolvimento dos materiais propriamente ditos, quanto evoluir na robustez, fiabilidade e eficiência do aparato associado à sua utilização, i.e. dispositivos de segurança e protecção dos materiais, sistemas de refrigeração, etc. Estimativas realizadas em 2002 pelo ISIS (*International Superconductivity Industry Summit*) previram o crescimento do mercado mundial dos supercondutores até próximo dos 38 biliões de dólares, bem como uma estimativa dos diferentes mercados nos quais os supercondutores virão a contribuir (Figura

2.30), justificando o panorama geral da evolução das aplicações industriais e de potência dos SATs ao longo dos tempos (Figura 2.31).

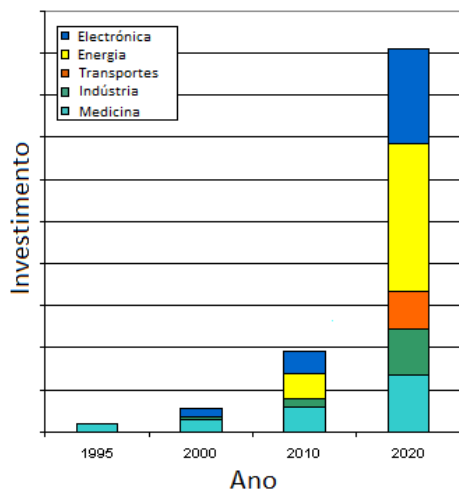


Figura 2.30 – Previsão da ISIS do investimento relativo em cada sector no mercado global dos supercondutores. Adaptado de (<http://superconductors.org/isisproj.gif>)

2.1.5.1 Máquinas Eléctricas Rotativas

Esta é uma área que recebeu uma atenção considerável como sendo uma potencial aplicação da supercondutividade. As principais vantagens face às máquinas convencionais são a redução do peso, volume e perdas (magnéticas e de Joule), aumento do rendimento e potência nominal de saída. Existe ainda uma diminuição na utilização de cobre e ferro e na manutenção, o que resulta num ciclo de vida de menor custo. Contudo, estas vantagens são contrabalançadas com os inevitáveis custos e volume associados ao sistema de refrigeração.

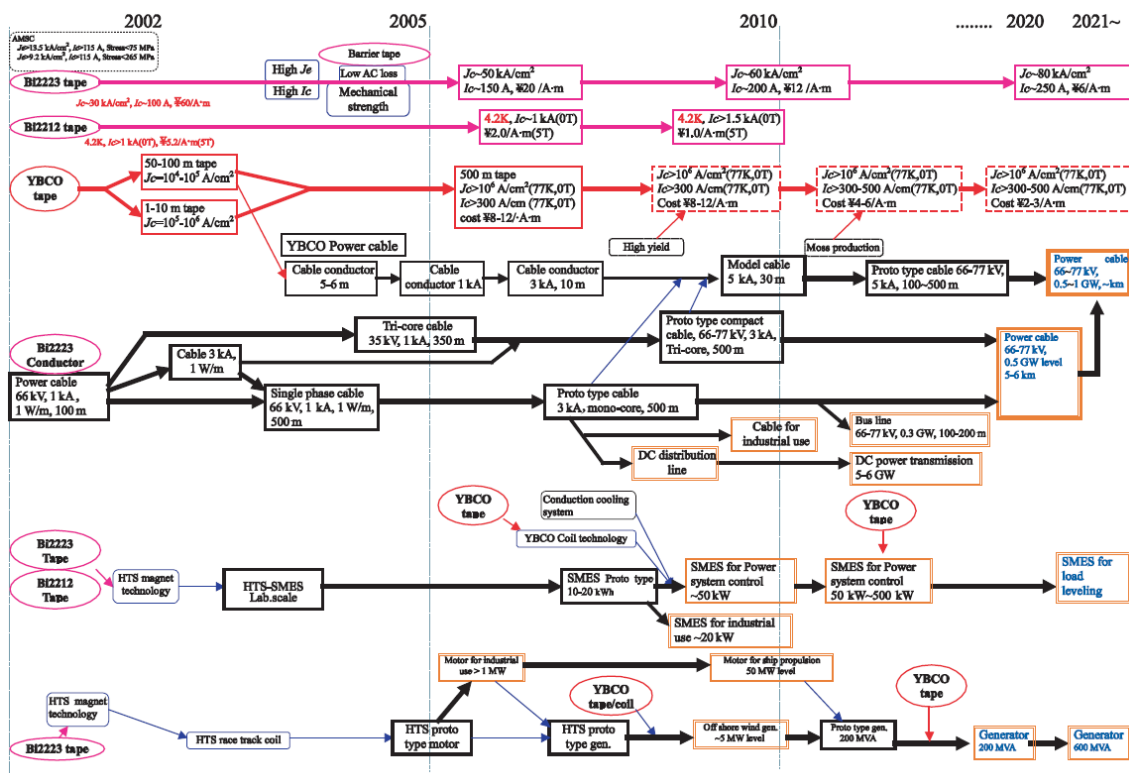


Figura 2.31 – Panorama geral das aplicações industriais e de potência dos SATs ao longo do tempo. Retirado de (Tsukamoto, 2005).

Refira-se a um motor SAT da *American Superconductors* para propulsão naval, de 36,2 MW, que teria menos de metade do tamanho e um terço do peso de um convencional de igual potência, para além de ter maior rendimento, menor custo de funcionamento, preços de manufactura equivalentes, menos ruído sonoro e maior flexibilidade de projecto (Figura 2.32). O mesmo tipo de comparações podem ser feitas em geradores eólicos, por exemplo (Kalsi, Gamble et al., 2006).

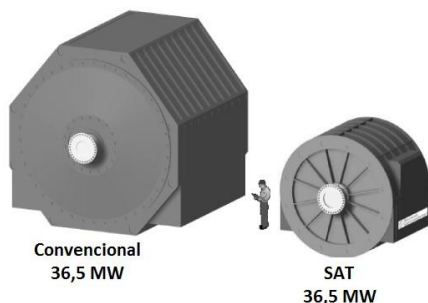


Figura 2.32 – Comparação entre um motor SAT e um convencional para o caso de um motor de 36.5 MW para propulsão naval. Adaptado de (<http://apps.shareholder.com/sec/viewerContent.aspx?companyid=AMSC&docid=4482230>).

Também os motores de relutância e de histerese se adaptam muito bem ao uso de SATs, nomeadamente com o fim de se diminuir o fluxo de dispersão e consequentemente as perdas

magnéticas associadas. Devido à enorme variedade de topologias de geradores e motores, não é conveniente aprofundar como são integrados os materiais SAT na construção das máquinas, já que isso vai além da substituição dos enrolamentos de cobre ou magnetos permanentes convencionais por materiais SAT. Contudo, na literatura é possível encontrar versões supercondutoras de máquinas homopolares, síncronas, de relutância, histerese, lineares, entre outros. Estudos efectuados defendem que motores supercondutores para aplicação industrial são muito promissores num futuro próximo (Tsukamoto, 2005).

De referir que as máquinas supercondutoras encontram aplicações na **indústria de transportes**, do qual é exemplo o Yamato (Matora, Takezawa et al., 1991), navio japonês de propulsão MHD (MagnetoHidrodinâmica) ou o JR-Maglev² japonês (Sawada, 1996), entre outros projectos similares.

2.1.5.2 Cabos de Energia

Os cabos de transmissão supercondutores são muito considerados em áreas com elevada densidade populacional, como o Japão ou Estados Unidos. Os cabos supercondutores são capazes de transportar bastante maior densidade de corrente do que cabos convencionais de igual secção, com a vantagem de apresentarem perdas AC muito reduzidas quando comparadas com as dos cabos convencionais, e perdas DC nulas, o que reduz um dos grandes problemas no transporte de energia. O principal obstáculo está no sistema de refrigeração, dado as distâncias envolvidas e portanto normalmente encontram-se instalados em vias subterrâneas. Assim, em locais de rede de energia saturada, a instalação de cabos SAT pode evitar a construção de subestações intermédias e outras infra-estruturas que seriam necessárias para transmitir a mesma potência com cabos convencionais, já que o transporte é feito a mais alta corrente.

Vários projectos foram desenvolvidos desde a descoberta dos SATs, alguns com já quase uma década. Uma colaboração entre a KEPCO (*Korea Electric Power Corporation*) e a *LS Cable* levou à instalação de um cabo SAT de 22,9 kV, 50 MVA e 410 metros de comprimento na subestação de Icheon de 154 kV pertencente à rede eléctrica da KEPCO (Figura 2.33). Depois de instalado, foram efectuados ensaios que provaram o sucesso da instalação de acordo com as especificações de projecto, sem falhas e com uma corrente crítica DC superior a 3770 A a uma temperatura de funcionamento de 69 K. O cabo foi energizado na referida subestação dia 19 de Agosto de 2011 e tem funcionamento previsto até 2013, período no qual será averiguado o custo-benefício do projecto (Song-Ho, Hyung-Suk et al., 2012).

² “JR-Maglev”, cujo nome deriva do termo em inglês para levitação magnética, *MAGnetic LEVitation*. O projecto foi desenvolvido pelo grupo JR, Japan Railways.

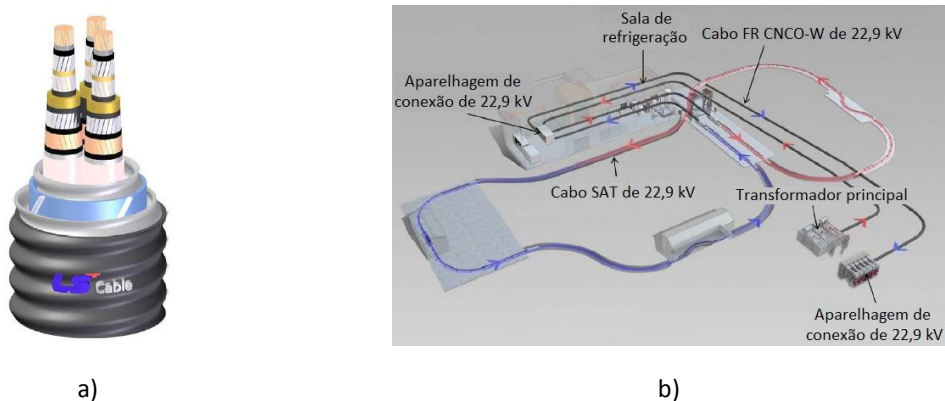


Figura 2.33 – a) Diagrama esquemático da estrutura do cabo SAT. b) Percurso do cabo e instalações periféricas na subestação de Icheon da KEPCO. Adaptado de (Song-Ho, Hyung-Suk et al., 2012).

Outro projecto, mais antigo mas mais ambicioso, liderado pela *American Superconductor* em parceria com a *Nexans* e a *Air Liquide*, trata do primeiro cabo SAT trifásico de longa distância (Figura 2.34). Com as especificações da Tabela 2.3, foi instalado em Abril de 2008 na rede eléctrica de *Long Island Power Authority* (LIPA), onde foi sujeito a ensaios que confirmaram o sucesso do projecto. Actualmente está em desenvolvimento uma segunda versão do projecto, LIPA 2, que irá integrar o mesmo local (Maguire, Schmidt et al., 2009).

Tabela 2.3 – Especificações de projecto do cabo SAT da *Americam Superconductors* instalado na LIPA. Adaptado de (Maguire, Schmidt et al., 2009).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Tensão	138 kV
Corrente	2,4 kA _{rms}
Potência Aparente	574 MVA
Comprimento	600 m
Corrente de Curto-Circuito	51 kA _{rms} @200 ms
Temperatura de funcionamento	73 K



a)



b)

Figura 2.34 – a) Representação esquemática da estrutura do cabo SAT. b) Final do cabo instalado na LIPA. Retirado de (Maguire, Schmidt et al., 2009).

2.1.5.3 Armazenamento de Energia (SMES)

O armazenamento de energia em electromagnetos supercondutores (SMES – *Superconducting Magnetic Energy Storage*) é uma tecnologia baseada na capacidade dos supercondutores de transportar elevadas correntes DC sem perdas resistivas na presença de campos magnéticos significativos. Assim, a energia é armazenada no campo magnético do magneto ou da bobina supercondutora, percorridos por uma corrente DC que circula de forma persistente. Estudos efectuados sugerem que cerca de 8% da capacidade de geração de energia deve ser na forma de armazenamento que carregue durante a noite e descarregue durante o dia (Hassenzahl, Hazelton et al., 2004). Os SMES contudo, são actualmente utilizados para suprimir curtas falhas de energia, garantir a estabilidade e qualidade da rede e fazer o acondicionamento de potência.

Os SMES são equipamentos de alto rendimento quando comparados com outros dispositivos de armazenamento de energia e são projectados com potência de saída adequada ao tipo de aplicação. Na sua maioria são utilizados materiais SAT em aplicações reduzidas, chamadas microSMES. Um possível exemplo é um SMES de 1 MJ/0,5 MVA onde foi utilizado um magneto SAT feito com fita de Bi2223/Ag (Figura 2.35). O sistema foi projectado e ensaiado segundo os parâmetros da Tabela 2.4 e foi posto em funcionamento a 16 de Fevereiro de 2011 numa subestação de 10,5 kV em Baiyin, na China (Jingye, Shaotao et al., 2012).

Tabela 2.4 - Especificações de projecto do SMES de 1 MJ. Adaptado de (Jingye, Shaotao et al., 2012).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor de projecto</i>	<i>Valor de ensaio</i>
Altura	645 mm	648 mm
B máximo	5,72 T @ 565 A	-
Comprimento total de fita supercondutora	16,4 km	16,4 km
Corrente Nominal	565 A	560 A
Diâmetro exterior	568 mm	568 mm
Diâmetro interior	400 mm	400 mm
Energia armazenada	1,0 MJ	1,0 MJ
Indutância	6,28 H	6,38 H
Nº. de panquecas duplas	44	44
Temperatura de operação	4,2 K	4,2 K
Tensão Nominal	2 kV _{DC}	2 kV _{DC}

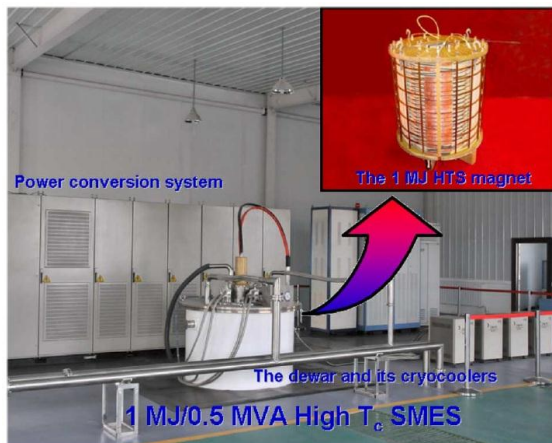


Figura 2.35 - Sistema SMES de 1 MVA instalado em Baiyin, na China. Retirado de (Jingye, Shaotao et al., 2012).

2.1.5.4 Transformadores e Limitadores de Corrente

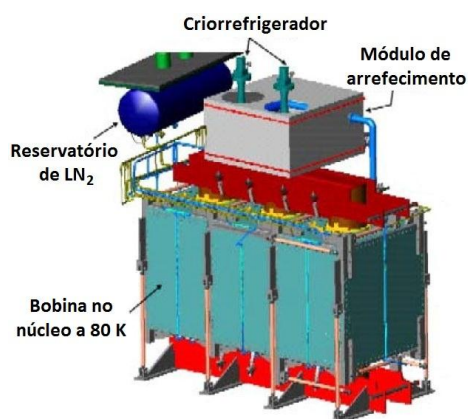
Os transformadores constituem uma parte muito significativa do investimento total num sistema de distribuição de energia e portanto representam um potencial mercado muito relevante. Os transformadores supercondutores oferecem uma variedade de benefícios, entre eles o aumento do rendimento, a capacidade de operar em sobrecarga sem impactos no ciclo de vida, tamanho e pesos reduzidos, menores perdas resistivas e menor impacto ambiental, já

que o óleo é eliminado. A relação custo/benefício parece favorecer os transformadores SAT para potências superiores a 30 MVA, excepto em aplicações nicho onde o tamanho reduzido seja mais importante que o custo (Pleva and Schwenterly, 2004).

Um projecto de um transformador foi desenvolvido em equipa por *Waukesha Electric Systems* (fabricante do transformador), *SuperPower, Inc.* (fabricante do SAT), *Oak Ridge National Lab* e *Energy East*, para construir e ensaiar um protótipo de 5/10 MVA, cujas características são referidas na Tabela 2.5. Os ensaios efectuados permitiram a sua integração na rede eléctrica para alimentar as instalações da *Waukesha Electric Systems*, em Wisconsin (Figura 2.36). O protótipo diz respeito à segunda de três fases de um programa que culmina na construção de um transformador de 30/60 MVA (Weber, Reis et al., 2005).

Tabela 2.5 - Especificações de projecto do transformador SAT de 5/10 MVA. Adaptado de (Weber, Reis et al., 2005).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Ligação	Trifásica, Δ/Y
Tensão Primário/Secundário	24,9/4,2 kV
Corrente Primário/Secundário	116/694 A
Temperatura	30-50 K



a)



b)

Figura 2.36 – a) Esboço dos componentes do transformador de 5/10 MVA. b) Transporte do transformador em fase concluída. Retirado de (Pleva and Schwenterly, 2004).

Relativamente aos limitadores de corrente supercondutores, dado que estes serão alvo de uma secção dedicada, serão abordados mais adiante.

2.1.6 Conclusão

Nesta secção foi introduzido o conceito da supercondutividade e contextualizado o seu percurso histórico, bem como as propriedades e fenómenos associados. Depois disso, falou-se dos diferentes tipos de materiais supercondutores bem como as aplicações práticas e sectores de mercado nos quais são vistos com mais interesse.

Optou-se por não fazer uma abordagem detalhada das várias teorias da supercondutividade, dado que em nada contribuiriam para os conceitos associados ao tema da dissertação, além de que ultrapassam os fundamentos do electromagnetismo para entrarem nos domínios da mecânica e física quântica. A mesma abordagem foi tomada no que diz respeito às estruturas e propriedades microscópicas dos materiais, bem como aos seus métodos de modelização, já que são temas que não tocam directamente a metodologia e conceitos do trabalho desenvolvido, evitando assim alongar em demasia este capítulo, que ainda assim se mostra algo extenso.

2.2 Limitadores de Corrente de Curto-circuito (LCS)

2.2.1 Introdução

Uma das aplicações possíveis dos supercondutores são os limitadores de corrente supercondutores (LCSs). A impedância de uma rede é uma característica importante à qual está associada um compromisso incontornável: uma impedância baixa origina baixas quedas de tensão e elevada estabilidade da rede, contudo uma impedância alta minimiza a severidade das consequências em caso de falha. A ocorrência de falhas na rede traduz-se em correntes elevadas de curto-circuito que, se não forem evitadas ou suprimidas, podem danificar irreversivelmente os equipamentos numa rede de energia. É neste sentido que surgem os limitadores de corrente, nomeadamente os supercondutores. Como se irá ver, as propriedades inerentes a estes materiais são propícias ao desenvolvimento destes dispositivos.

Uma especificação típica num limitador de corrente inclui os seus valores nominais de tensão e corrente, o valor da corrente limitada, o valor do curto-circuito máximo permitido, o pico de corrente de curto-circuito esperado, e o pico de corrente de curto-circuito máximo admitido. Uma vez que este é o tipo de dispositivo à volta do qual se desenvolveu este trabalho, foca-se agora este assunto, passando pelas suas funções e sublinhando as suas vantagens face aos sistemas convencionais de controlo de corrente numa rede. Por último, dá-

se a conhecer alguns dos diferentes tipos de limitadores de corrente, referindo alguns projectos de implementação encontrados na bibliografia.

2.2.2 Limitadores de Corrente Supercondutores vs Soluções Convencionais

Quando por algum motivo ocorre um curto-circuito, devido a uma descarga atmosférica, queda de um poste ou de uma árvore sobre as linhas de distribuição, ou até devido a um animal, existe uma diminuição abrupta da impedância da rede, o que leva ao aparecimento de uma corrente muito elevada, chamada corrente de curto-circuito. Quase instantaneamente, os dispositivos de segurança, normalmente relés de protecção, detectam a sobre-corrente e dão comando aos disjuntores para abrir o circuito. Segundos depois há uma tentativa de fechar o circuito e tudo volta à regularidade caso a falha tenha sido suprimida. Caso contrário, isto repete-se até que o disjuntor permanece aberto, sendo necessária a intervenção humana.

Uma falha séria pode originar correntes várias vezes superiores aos valores nominais, o que pode provocar arcos nos próprios dispositivos de protecção levando à destruição de equipamentos eléctricos da rede de energia ou até do consumidor. Além disso, o tempo de manutenção no qual a linha está fora de serviço pode significar enormes prejuízos nas indústrias locais. Assim, existe um esforço e necessidade constantes em manter a qualidade do serviço de distribuição de energia, sua robustez e fiabilidade, motivados essencialmente pelos clientes da indústria e comércio.

Apesar de nenhum deles ter provado ser verdadeiramente eficiente quando considerados os seus custos de instalação/manutenção, os métodos tradicionais para lidar com correntes de falha incluem (Leung, 1997, Feng, Gou et al., 2011):

- A. Disjuntores de alta corrente**, que apesar de comprovadamente fiáveis, só limitam a corrente na passagem por zero, são dispendiosos e de tempo de vida limitado.
- B. Fusíveis**, dispositivos simples e de baixo custo mas que queimam rapidamente (baixa capacidade de suportar uma corrente de falha), exigem substituição manual e inactivam toda a linha em caso de falha. Dificilmente escaláveis para aplicações de AT.
- C. Disjuntores pirotécnicos** (Limitador- I_s ou CLiP), apresentam baixa impedância em regime normal mas sofrem das mesmas desvantagens dos fusíveis.
- D. Transformadores de alta impedância**, que apesar de muito usados, introduzem ineficiência na rede (perdas elevadas).
- E. Bobinas com núcleo de ar**, também um método tradicional muito utilizado e de eficiência comprovada, apresentam elevadas quedas de tensão em regime

normal, introduzindo perdas consideráveis e exigem compensação de factor de potência.

- F. Reconfiguração da rede**, como separação de barramentos ou sub-redes, costumam ser preferíveis em áreas de crescimento rápido. Diminuem o número de fontes que podem alimentar uma falha, mas também o número de fontes que fornecem corrente de carga em regime normal. Reduzem a fiabilidade e flexibilidade dos sistemas e aumentam os custos de novas linhas e de abertura de disjuntores. Aumentam a impedância não só em condições de falha mas também em operação normal, podendo levar a alterações do modo de operação e controlo da rede.
- G. Construção de novas subestações**: esta solução corrige os problemas imediatos de elevadas correntes de curto-circuito e prepara a rede para um crescimento futuro, contudo, é a mais dispendiosa das soluções.

A Tabela 2.6 resume as vantagens e desvantagens dos referidos métodos, podendo estes ser passivos, que fazem uso da sua alta impedância em condições normais e de falha, ou activos, que surgem como fonte de alta impedância apenas em condições de falha. Cada método é referido na tabela com a sua respectiva letra.

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens dos métodos tradicionais de protecção contra falhas (Leung, 1997).

<i>Critério</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Limitação	+	+	+	+	+
Baixa Impedância em regime normal	–	–	+	–	–
Alta impedância em regime de falha	+	+	+	+	+
Acção automática	–	–	–	+	+
Continuação de operação em caso de falha interna	–	–	–	–	–
Custo	–	+	–	–	+

ACTIVOS	PASSIVOS
---------	----------

Segundo (Leung, 1997), um limitador de corrente ideal seria um dispositivo com as seguintes características:

- Impedância nula em regime de funcionamento normal.
- Impedância suficientemente elevada em condições de falha.
- Rápida detecção da falha e início da acção preventiva (limitação do primeiro pico).
- Recuperação imediata ao estado normal (menos de meio ciclo).
- Capacidade de suprimir duas falhas em menos de 15 segundos.
- Imune a falhas internas e, caso as haja, capacidade para continuar a operar sem afectar a corrente na linha.
- Abusando do termo “ideal”, devem ainda ser compactos, leves, de baixo custo, totalmente automáticos, fiáveis e com longo ciclo de vida.

Dada a capacidade dos SATs de conduzir elevadas densidades de corrente e de transitar rapidamente entre um estado de impedância nula e um de alta impedância, os LCS são aplicações naturais da supercondutividade e, equipados com sistemas electrónicos e de controlo adequados, podem satisfazer algumas das condições ideais indicadas. As vantagens destes dispositivos dependem da sua própria topologia, da aplicação e da estrutura da rede, mas geralmente são mais atractivos em redes de demanda energética em crescimento rápido, com elevadas cargas e em sistemas muito distribuídos, com várias unidades de geração de energia.

De facto, um LCS estrategicamente bem instalado, para além de limitar correntes de falha, evita sobredimensionamentos, *upgrades* e substituições dos dispositivos de protecção existentes e de outros equipamentos (transformadores e.g.) na expansão natural de uma rede de distribuição, introduzindo baixas perturbações, baixas quedas de tensão em regime normal, enquanto lhe conferem um aumento na segurança, qualidade, eficiência, fiabilidade, flexibilidade e estabilidade. Seriam por isso capazes de ser classificados com ‘+’ em todas as linhas da Tabela 2.6.

2.2.3 Limitadores de Corrente numa Rede de Energia

Nos dias que correm as redes de energia estão em constante crescimento e a liberalização do mercado energético foca os esforços na satisfação do cliente, através da fiabilidade, qualidade e economia dos serviços prestados. O aumento na geração de energia, particularmente proveniente de diferentes fontes renováveis, obriga ao acoplamento de várias redes, o que origina uma redução na impedância efectiva e, por conseguinte, maiores

correntes de curto-circuito. Nestas redes cada vez mais distribuídas, uma falha origina um enorme *stress* mecânico e térmico nos equipamentos que a integram, pelo que a localização dos dispositivos de protecção, nomeadamente dos LCS, deve ser estrategicamente decidida. Segundo (Bauml and Kaltenborn, 2011), possíveis aplicações benéficas de LCS numa rede de transmissão (alta tensão, AT, acima dos 72 kV) e distribuição (média tensão, MT, 6-72 kV) e respectivas vantagens, são (Figura 2.37):

1. **Protecção de geradores:** um LCS na ligação do gerador aumenta a impedância de curto-circuito, evitando *stress* mecânico e térmico em caso de falha. Confere ainda maior flexibilidade à localização de centrais e evita *upgrades* no sistema.
2. **Auxiliares de centrais eléctricas:** os equipamentos auxiliares das centrais eléctricas têm normalmente uma impedância baixa, que pode ser drasticamente reduzida com um LCS. Diminui ainda perturbações e quedas de tensão, evita sobredimensionamentos e aumenta a estabilidade da rede.
3. **Acoplamento de sub-redes:** este processo ajuda no escoamento energético da rede, conferindo-lhe estabilidade e segurança, evitando perdas na rede devido a perturbações e quedas de tensão.
4. **Acoplamento de barramentos:** aumenta a distribuição da rede sem aumentar a sua impedância efectiva. Permite o uso de transformadores menores e aumenta a estabilidade da rede, diminuindo perturbações e perdas.
5. **Shunt de limitadores de corrente reactivos (bobinas com núcleo de ar):** durante a operação normal, o LCS curto-circuita os limitadores reactivos, evitando assim a queda de tensão aos seus terminais.
6. **Linha do transformador:** protege os equipamentos subsequentes, evitando que tenham de ser sobredimensionados.
7. **Ligação a barramentos:** em vez de se usar um LCS na linha do transformador, ele pode ser colocado na ligação do barramento. Apesar de serem necessários mais LCSs, isso reduz o esforço do equipamento em condições normais e de falha.
8. **Combinação de outros equipamentos supercondutores:** LCS são necessários para protecção de outros dispositivos supercondutores nas suas transições de estado, pois isso traduz-se na sua destruição ou longos períodos de inactividade.
9. **Acoplamento de unidades locais de geração:** para interligar unidades de geração locais instaladas mais tarde, e.g. de fontes renováveis, os LCS são necessários na redução da sua contribuição nas correntes de curto-circuito.
10. **Fechamento de circuitos em anel:** em redes MT, por vezes os circuitos em anel são abertos devido a elevadas correntes de curto-circuito. Estes circuitos podem ser fechados com um LCS, o que traz à rede mais estabilidade e menos perdas.

Além disso os LCS podem ser ligados na **protecção de cargas críticas** de clientes. Estudos efectuados em redes de até 110 kV comprovam que as localizações mais atractivas seriam **1, 2, 3, 4, 6 e 10** (Noe and Oswald, 1999).

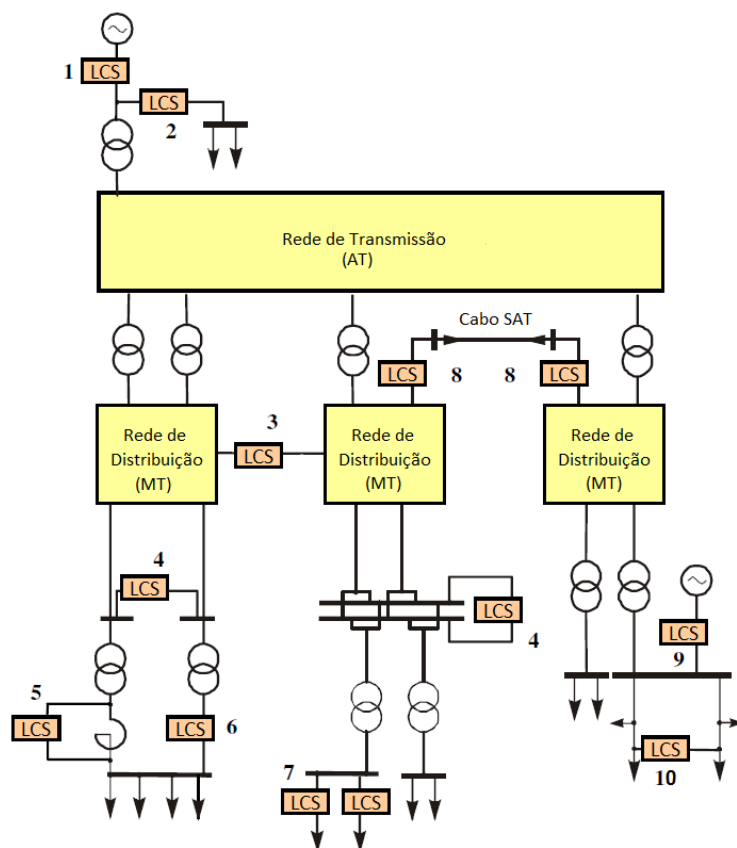
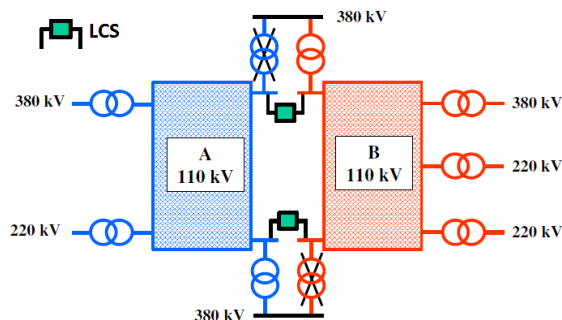


Figura 2.37 – Possíveis aplicações benéficas de LCS em redes de transmissão e distribuição. Adaptado de (Schmitt, 2006).

A reconfiguração da rede é normalmente usada para reduzir as correntes presumidas de curto-circuito mas isso resulta na perda de fiabilidade e flexibilidade. Para finalizar, a Figura 2.38 mostra um exemplo prático de como é possível reduzir o número de transformadores necessários na interligação de duas sub-redes de 110 kV, caso se usem LCS para o efeito (Schmitt, 2006). Outros exemplos concretos de aplicações de LCS que se mostraram vantajosas podem ser vistos em (Hassenzahl, Hazelton et al., 2004, Noe and Steurer, 2007).

Figura 2.38 – Acoplamento de duas sub-redes de 110 kV com LCS, reduzindo o número de transformadores necessários. Adaptado de (Schmitt, 2006).



2.2.4 Tipos de Limitadores de Corrente de Curto-circuito.

Avaliadas as suas vantagens e aplicabilidades, interessa agora abordar quais os tipos de limitadores de corrente mais frequentes, referenciando alguns exemplos. Como é sabido, estes tiram partido da não linearidade das propriedades dos materiais, nos quais se inserem não só os SATs, mas também o ferro ou semicondutores. Esta secção está estruturada de acordo com a Tabela 2.7, sugerida por (Pina, Neves et al., 2010). Importante é referir que serão explicados os diversos tipos e variantes nas suas versões monofásicas, já que o conceito se mantém para limitadores trifásicos. Estes últimos, mais interessantes do ponto de vista industrial e comercial, podem ser projectados de origem ou agregando três módulos monofásicos.

Existem também outros tipos, não supercondutores, baseados essencialmente em electrónica de potência e interruptores mecânicos de elevada rapidez de comutação. Alguns exemplos são os limitadores por resistência de coeficiente de temperatura positivo, em inglês, *“Positive Temperature Coefficient (PTC) Resistor Fault Current Limiter”* e os limitadores de corrente estáticos, em inglês, *“Solid-State Fault Current Limiter”*. Dado que estes não estão ligados à supercondutividade, não serão abordados, podendo ser consultadas as seguintes referências para mais informação: (Noe and Steurer, 2007, Feng, Gou et al., 2011).

Tabela 2.7 – Classificação dos limitadores de corrente de curto-circuito de acordo com os seus diferentes tipos e características.

Resistivos	<ul style="list-style-type: none">• Puro.• Com amortecimento assistido por campo magnético.	
Indutivos	Com transição de estado	<ul style="list-style-type: none">• Indutivo, de blindagem magnética ou transformador• Híbrido• Captura de fluxo• Transformador com núcleo de ar
	Sem transição de estado	<ul style="list-style-type: none">• Núcleos de ferro saturados ou núcleos de ferro polarizados em DC
Rectificadores	<ul style="list-style-type: none">• Bobina com núcleo de ar• Bobina com núcleo de ferro	

2.2.4.1 Limitadores de corrente Resistivos

LCS Resistivo puro

A acção do limitador resistivo puro (Figura 2.39) é baseada na passagem do estado supercondutor do material para o estado normal, a chamada transição de estado (em inglês “*quench*”). De construção simples, não passa de um SAT ligado em série com a linha, que em regime de funcionamento normal está arrefecido e permanece no estado supercondutor, tornando o dispositivo transparente para a rede, uma vez que a resistência e perdas do SAT são, nesta altura, desprezáveis. Na ocorrência de uma falha, a corrente da linha ultrapassa a corrente crítica, o que faz com que o material transite para o seu estado normal, desenvolvendo uma resistência considerável, limitando assim a corrente.

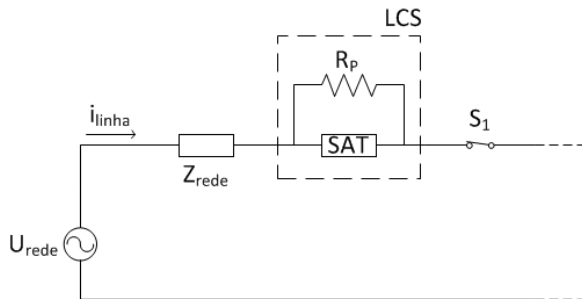


Figura 2.39 – Esquema eléctrico de um LCS resistivo puro.

A resistência em paralelo, R_p , serve para proteger o material da formação dos chamados “pontos quentes” (“*hot spots*”) durante a transição. Estes pontos tendem a surgir aquando da transição de estado, quando esta acontece de forma localizada, em vez de homogeneamente por todo o material. Surgem então pontos específicos onde o material passa ao estado normal antes do resto do material, sobreaquecendo e degradando o supercondutor. Segundo (Tixador, Buzon et al., 2002), uma operação normal perto da temperatura crítica do material favorece uma transição homogénea, evitando a formação de pontos quentes. O controlo da temperatura do banho criogénico pode ser feito ajustando a pressão e/ou instalando uma resistência de aquecimento no crióstato.

Assim, esta resistência oferece um caminho alternativo à passagem da corrente e deve estar em contacto com todo o comprimento do supercondutor. Adicionalmente, ajusta a corrente limitada e evita que surjam sobretensões caso a transição do SAT para o estado normal seja demasiado brusca. Recuperada a falha, a corrente volta a diminuir naturalmente, o SAT transita de volta para o estado supercondutor e o limitador volta a ficar invisível na rede. Caso a falha persista, pode existir um interruptor, S_1 , que é aberto posteriormente à limitação da corrente, evitando o sobreaquecimento do supercondutor (Figura 2.40). O tempo de recuperação varia com o material utilizado e com o projecto de construção. Podendo ser

utilizados materiais maciços ou fita, os tempos de recuperação rondam um minuto ou de um a vários segundos, respectivamente (Noe and Steurer, 2007).

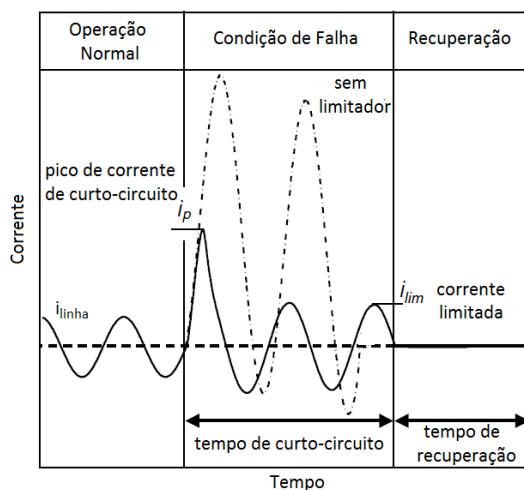
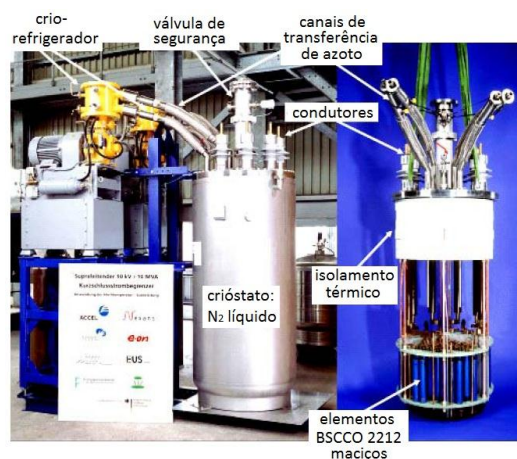


Figura 2.40 – Funcionamento de um LCS resistivo puro. Adaptado de (Noe and Steurer, 2007).

O caso de maior sucesso deste tipo de LCS foi o projecto alemão CURL10, onde foi projectado, construído, simulado, ensaiado e instalado um limitador de corrente resistivo trifásico de 10 kV/10 MVA (Figura 2.41). De financiamento público, este dispositivo usa 90 bobinas bifilares de BSCCO-2212 maciço para limitação a uma temperatura de operação de 66 K. Na fase de ensaios, uma falha de 60 ms com uma corrente de curto-circuito presumida de 18 kA foi limitada eficazmente para 7,2 kA. O sucesso do projecto levou a que o equipamento fosse instalado na ligação de um barramento de 10 kV, na rede de RWE em Netphen, perto da cidade de Siegen, na Alemanha, em Março de 2004 (Kreutz, Bock et al., 2005).

Figura 2.41 – Aparato completo do LCS trifásico resistivo CURL10. Adaptado de (Neumann, 2006).



As primeiras aplicações comerciais de LCS resistivos surgiram na sequência dos resultados demonstrados pelo CURL10, tratando-se de dois projectos muito idênticos ao

primeiro, levados a cabo pela *Nexans SuperConductors GmbH*, sem financiamento público. Um dos equipamentos foi instalado num barramento de uma subestação na Grã-Bretanha e outro na subestação da central “Boxberg” em Saxony, Alemanha (Figura 2.42). A Tabela 2.8 mostra as especificações de ambos (Dommerque, Krämer et al., 2010).

Tabela 2.8 – Especificações dos projectos de aplicação comercial de LCS resistivos. Adaptada de (Dommerque, Krämer et al., 2010).

<i>Parâmetro</i>	<i>Projecto 1 (Grã-Bretanha)</i>	<i>Projecto 2 (Alemanha)</i>
Tensão nominal	12 kV	12 kV
Corrente nominal	100 A	800 A
Corrente máxima de pico	460 A (10 s)	4.1 kA (50 ms) seguida de 1.8 kA _{rms} (15 s)
Corrente presumida	50 kA	63 kA
Limitação do primeiro pico de corrente	<6 kA	<30 kA
Tempo de limitação	120 ms	120 ms
Perdas totais	150 W	2 kW
Temperatura de operação	73 K	65 K



Figura 2.42 – LCS trifásico resistivo completo e instalado na central eléctrica “Boxberg” em Saxony, Alemanha (projecto 2). Retirado de (Dommerque, Krämer et al., 2010).

LCS Resistivo com amortecimento assistido por campo magnético.

O problema da formação de pontos quentes impossibilita a aplicação dos LCSs resistivos puros em redes de AT. Nesse sentido, os LCS com amortecimento assistido por campo magnético (Figura 2.43) surgem como uma variante dos anteriores, onde no lugar da resistência é ligada uma bobina condutora normal, L_{amort} , em paralelo com o SAT, disposta axialmente do lado de fora do mesmo, para evitar a formação de pontos quentes durante a transição de estado. Este tipo de LCS faz uso da dependência que a corrente crítica tem do campo magnético. Assim, quando se inicia a transição do SAT para o estado normal, o aumento da resistência força a corrente a percorrer a bobina condutora em paralelo. O campo magnético resultante faz diminuir a corrente crítica nos locais do SAT que ainda estão supercondutores, acelerando e homogeneizando assim a transição de estado.

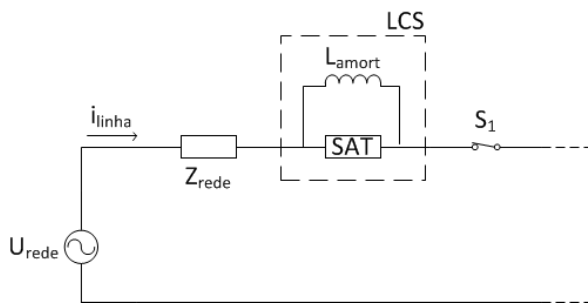


Figura 2.43 - Esquema eléctrico de um LCS resistivo com amortecimento assistido por campo magnético.

A metodologia foi proposta por (Elschner, Breuer et al., 2006), cujo projecto base seria o CURL10, mas apontando agora para uma rede de 110 kV. As especificações deste novo projecto, o CULT110, são referidas na Tabela 2.9. Os ensaios efectuados revelaram que, comparativamente com o seu antecessor CURL10, a nova metodologia adoptada permitia, na mesma proporção, diminuir as perdas e a quantidade de material SAT. Este projecto era em 2008 o maior limitador de corrente supercondutor trifásico na Europa, com cerca de 650 elementos SAT por fase (Figura 2.44), tendo em fase de ensaio limitado uma corrente presumida de 10,2 kA para 3,7 kA no primeiro meio ciclo após ocorrência da falha e até 1,1 kA_{rms} no tempo de limitação (Elschner, Stemmler et al., 2008).

Figura 2.44 – Elemento SAT do projecto CULT110 em forma de tubo maciço, introduzido dentro de uma bobina condutora normal e ligados em paralelo. Retirado de (Elschner, Stemmler et al., 2008).



Tabela 2.9 – Especificações do projecto CULT110. Criado com base em (Elschner, Breuer et al., 2007).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Tensão nominal	110 kV _{rms}
Corrente nominal	1850 A
Corrente de pico presumida	80 kA
Corrente presumida	31,75 kA
Limitação do primeiro pico de corrente	<40 kA
Limitação da corrente	6 kA
Tempo de limitação	60 ms

Conclusões

Os LCS resistivos são normalmente dispositivos de rápida acção na limitação da corrente de curto-circuito, já que os elementos SAT estão ligados em série com a linha. Apesar de compactos, necessitam de uma elevada quantidade de elementos SAT ligados em série, o que agrava os problemas de amortecimento durante a transição de estado, levando à formação de pontos quentes que degradam o material. Na sequência deste problema vêm também os tempos de recuperação consideráveis quando comparados com outras tecnologias, dado o sobreaquecimento do material SAT durante a acção limitativa. Por estas razões estes limitadores encontram alguns obstáculos em aplicações de AT. É importante referir que, na verdade, a impedância do material enquanto supercondutor só é verdadeiramente nula em regime DC, contudo, em aplicações AC existem sempre perdas associadas que têm de ser contabilizadas. Estas são altamente influenciadas pela geometria do material e apesar de praticamente não contribuírem para a impedância do LCS, existe dissipação de energia que aumenta os custos de refrigeração. Por outro lado, caso ocorra uma falha interna no dispositivo, e.g. no sistema de refrigeração, o ramal onde este está instalado tem de ser desactivado.

2.2.4.2 Limitadores de corrente indutivos

Este tipo de limitadores vê o seu funcionamento baseado em fenómenos magnéticos, normalmente relacionados com o fluxo magnético criado durante a situação operação. Como referido na Tabela 2.7, estes são limitadores supercondutores cujo funcionamento pode ou não englobar transição de estado, ou “*quench*”, do material SAT. Existem diversas topologias, entre elas a indutiva, de blindagem magnética ou transformador (tudo sinónimos da mesma

tecnologia), a híbrida, de captura de fluxo e a de transformador com núcleo de ar. Dos referidos, todos eles envolvem transição de estado e incorporam núcleo de ferro (aberto ou fechado), com a excepção obviamente do último e do de captura de fluxo, que pode ou não usar núcleo de ferro. Existe ainda uma topologia indutiva que não envolve a transição de estado, que é a de núcleos de ferro saturados.

Dado que o LCS desenvolvido no trabalho experimental desta dissertação se inclui nesta categoria, os limitadores de corrente indutivos têm a sua secção dedicada (secção 2.3), onde serão abordados com mais detalhe, dispensando assim aprofundar o assunto nesta fase.

2.2.4.3 Limitadores de corrente rectificadores

Os limitadores de corrente do tipo rectificador (Figura 2.45), na literatura sob o nome de “*Bridge Type*”, usam díodos ou tirístores numa ponte rectificadora completa, uma fonte de tensão DC e uma bobina SAT. Esta fonte, U_{pol} , serve como tensão de polarização para criar I_0 e deve ser correctamente dimensionada para que esta tenha o valor adequado de acordo com a aplicação em específico. Em regime normal de operação, a corrente de linha i_{linha} é menor que a corrente DC I_0 e todos os díodos estão em condução, sendo assim ignorada a indutância da bobina SAT, L_{SAT} . Assim, em condição normal, a impedância do dispositivo é baixa, sendo as perdas e quedas de tensão originadas essencialmente pela electrónica de potência. Em caso de falha, a corrente de linha i_{linha} aumenta e passa a ser maior que I_0 , o que faz com que os pares de díodos D_3, D_4 ou D_1, D_2 entrem ao corte, caso a falha ocorra no meio ciclo positivo ou negativo de i_{linha} , respectivamente. Nesta situação, a corrente é então limitada pela indutância supercondutora L_{SAT} (Figura 2.46). Caso sejam usados tirístores no lugar dos díodos, a ponte rectificadora passa a ser controlada com os ângulos de disparo, ajudando na limitação da corrente. O limitador conseguiria assim anular a corrente de falha em menos de meio ciclo, permitindo que a bobina fosse ainda menor e o interruptor S_1 mais barato, de menor corrente (Hassenzahl, Hazelton et al., 2004).

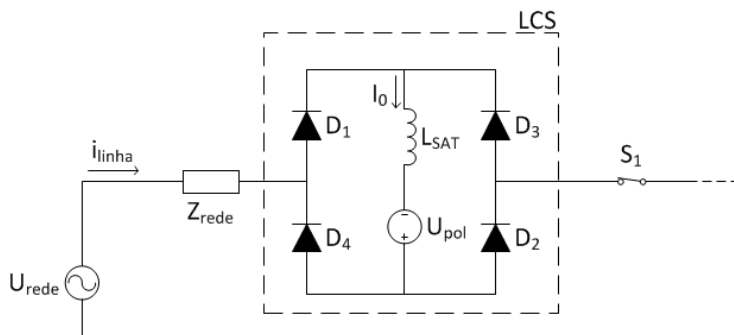
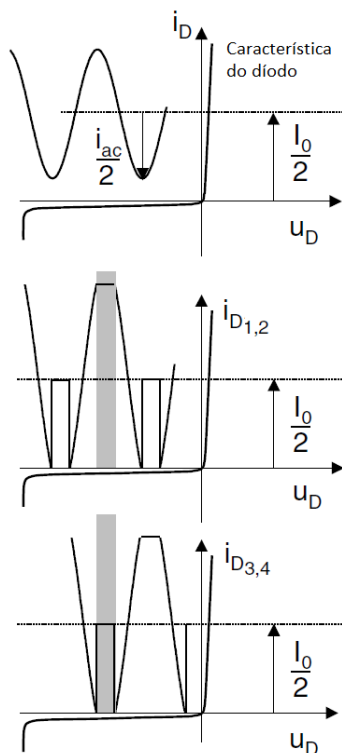


Figura 2.45 - Esquema eléctrico de um LCS rectificador ou “*Bridge Type*”.

Teoricamente, a indutância poderia não ser supercondutora, mas isso iria resultar em bobinas de maiores dimensões e em perdas elevadas devido à corrente contínua que a atravessa. Apresentando o material supercondutor perdas nulas em regime DC, este problema não se põe se usada uma bobina SAT. Assim sendo, neste dispositivo não há transição de estado, já que em nenhuma altura L_{SAT} passa ao estado normal. Por esta razão, a bobina mantém-se a uma temperatura criogénica constante, o que faz com que a recuperação do dispositivo seja imediata após uma falha, evitando tempos de arrefecimento do material ou formação de pontos quentes como acontece no tipo resistivo. Outra vantagem é que a corrente de disparo pode ser ajustada através da corrente I_0 , o que torna o dispositivo adaptável a eventuais mudanças na rede. Contudo, este tipo de limitador não é imune a falhas internas, já que deixa de limitar, por exemplo, na falha de um dos dispositivos electrónicos. De facto, os limitadores rectificadores não são adequados a aplicações de AT pois a electrónica de potência começa a tornar-se falível e a apresentar perdas totais elevadas (Pina, Neves et al., 2010).



Operação normal (sem limitação):
 $i_{linha} < I_0$

Figura 2.46 – Característica do díodo e das correntes num LCS rectificador. Adaptado de (Noe and Steurer, 2007).

Operação em falha (limitação):
 $i_{linha} > I_0$
 Meio ciclo positivo
 D_1, D_2 conduzem
 D_3, D_4 ao corte se $i_{linha} > I_0$

Operação em falha (limitação):
 $i_{linha} > I_0$
 Meio ciclo negativo
 D_1, D_2 ao corte se $i_{linha} > I_0$
 D_3, D_4 conduzem

Existem na literatura algumas variantes destes dispositivos, como por exemplo a introdução de transição de estado na bobina supercondutora (Satoh, Yamaguchi et al., 2001) ou melhorias no circuito da electrónica de potência e introdução de unidades inteligentes de controlo, a fim de minimizar as harmónicas introduzidas na rede pelas pontes controladas por tirístores (Wanmin and Bin, 2009, Min Cheol and Tae Kuk, 2011). Também se encontram

exemplos de uso de bobinas SAT com núcleos de ferro, contudo, não é o cenário mais interessante dado o peso e volume acrescido.

Como exemplo, considere-se um projecto de um LCS rectificador trifásico de 10,5 kV/1,5 kA, desenvolvido pelo *Institute of Electrical Engineering* (IEE) na *Chinese Academy of Science* (CAS), que foi desenvolvido, ensaiado e instalado numa subestação de 110 kV/10,5 kV com cargas de 1 MVA, localizada em Hunan, na China, desde Agosto de 2005 (Figura 2.47). A bobina supercondutora, cujas características são referidas na Tabela 2.10, foi construída à base de panquecas duplas de fita de Bi-2223 e mostrou ser capaz de limitar uma corrente presumida superior a 3,5 kA para 635 A (Li, Gong et al., 2007).

Tabela 2.10 - Especificações de projecto da bobina supercondutora do LCS rectificador trifásico. Adaptado de (Li, Gong et al., 2007).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Altura	361.6 mm
Diâmetro interior	492/502 mm
Diâmetro exterior	580 mm
Número de panquecas duplas	14
Comprimento total de fita SAT	2856,8 m
Indutância	6,24 mH
Corrente nominal	330 A _{DC} @ 77,3 K
Corrente de pico	1500 A _{AC} @ 77,3 K
Tensão de operação	10,5 kV
Campo magnético máximo	0,1053 T @ 330 A



Figura 2.47 – LCS rectificador trifásico de 10,5 kV instalado na subestação de Gaoxi, em Hunan na China. Retirado de (Li, Gong et al., 2007).

2.2.5 Conclusão

Nesta secção introduziu-se os limitadores de corrente como aplicações directas dos materiais SAT, comparando-os com os mecanismos convencionais de protecção de redes eléctricas, onde foram comprovadas as suas vantagens. Seguidamente, foram discutidas quais as soluções mais benéficas para integrar os LCSs numa rede de transmissão/distribuição e apresentados os diferentes tipos de supercondutores, com excepção dos indutivos, que serão abordados de seguida.

2.3 Limitadores de Corrente Indutivos

2.3.1 Introdução

Nesta secção, exclusivamente dedicada a LCSs do tipo indutivo, será feita uma descrição das diferentes tecnologias que se incluem nesta categoria, bem como alguns projectos de implementação prática. Recuperando a Tabela 2.7, serão abordados primeiramente os dois principais tipos, dado o panorama actual da investigação e desenvolvimento, que são o indutivo, de blindagem magnética ou transformador, e o de núcleos saturados ou núcleos de ferro polarizados em DC. Só depois virão os restantes tipos, que incluem o tipo híbrido, o transformador com núcleo de ar e o de captura de fluxo.

2.3.2 Indutivo, de Blindagem Magnética ou Transformador

Assumindo na literatura qualquer um dos referidos nomes, este limitador consiste essencialmente numa bobina convencional de fio de cobre enrolada em torno de um núcleo de ferro e num cilindro SAT colocado entre a bobina e o núcleo. O princípio é essencialmente o de um transformador comum com o secundário em curto-circuito, onde o primário é alimentado em série pela linha a ser protegida e o cilindro SAT compõe o secundário. O supercondutor fica assim magneticamente ligado com a linha (Figura 2.48). N_1 é o número de espiras da bobina do primário e L_1 a sua indutância.

Em funcionamento normal, a corrente induzida no cilindro SAT mantém-se inferior ao valor de corrente crítica, pelo que o cilindro no estado supercondutor impede a penetração de fluxo no ferro, fazendo uma blindagem magnética perfeita (Figura 2.49a). Este fenómeno é explicado pelo efeito de Meissner, onde são induzidas correntes no cilindro de modo a anular o campo de indução magnética B no seu interior. O fluxo no ferro é assim desprezado, bem como a impedância do dispositivo, que é dada apenas pela resistência no enrolamento e a

indutância devido ao fluxo de dispersão entre a bobina e o cilindro. Na presença de uma corrente de curto-circuito, a corrente induzida no cilindro ultrapassa o valor crítico e inicia-se a transição ao estado normal. O cilindro desenvolve então resistência e começa a perder as suas capacidades de blindagem magnética, permitindo penetração de fluxo no ferro (Figura 2.49b), o que desenvolve uma indutância de magnetização. A impedância total do dispositivo é então dada pelo paralelo dessa indutância com a resistência do cilindro, reduzidas ao primário.

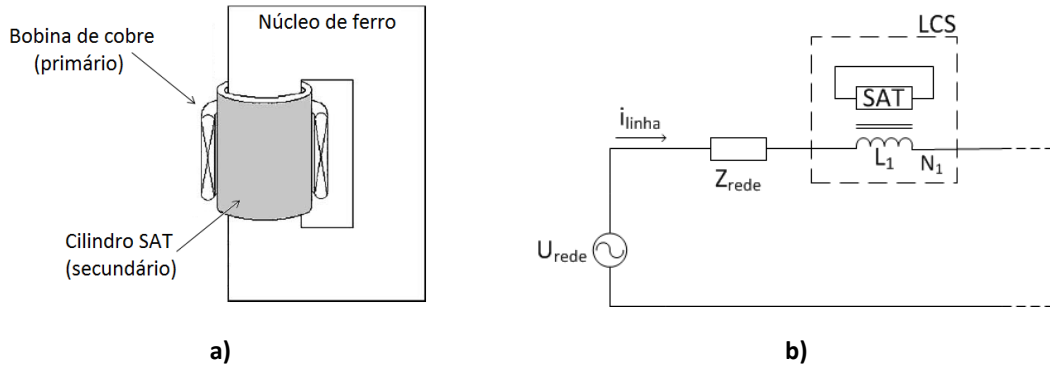


Figura 2.48 – a) Diagrama esquemático de um LCS indutivo. Adaptada de (Zong, Wang et al., 2003)
b) Esquema eléctrico de um LCS indutivo.

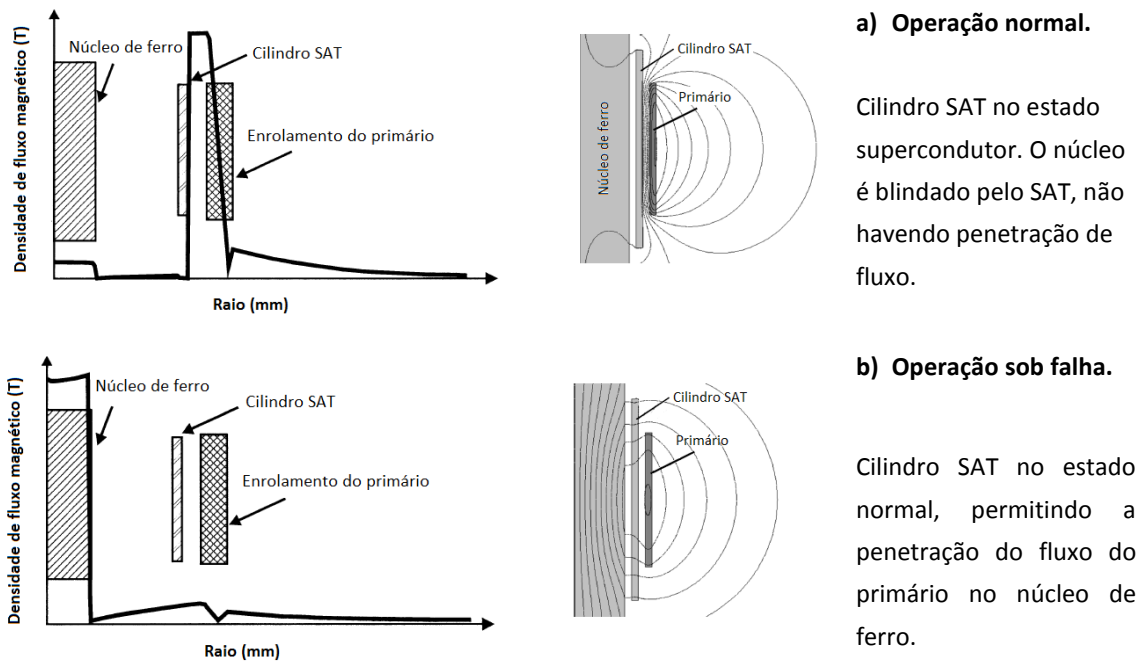


Figura 2.49 – Representação axial da indução magnética num LCS indutivo. Construído a partir de (Janowski, Kozak et al., 2003, Pina, Neves et al., 2010).

O núcleo de ferro utilizado pode ser aberto ou fechado conforme a aplicação e/ou necessidade de limitação. Já o material supercondutor pode ser na forma de um tubo

cilíndrico maciço, como referido, ou pode ser composto por vários anéis sobrepostos, ou até mesmo por fita supercondutora, geralmente enrolada em panquecas por forma a assumir a forma cilíndrica. A forma do SAT pode aparentar ser uma desvantagem mas em cerâmicos, a geometria cilíndrica é mais fácil de realizar do que as formas longas usados nos LCS resistivos, o que se torna uma vantagem. O material, apesar de estar sujeito a elevadas correntes induzidas durante a falha, não é sujeito a elevadas tensões. Ao contrário de certos tipos de limitadores, e.g. os rectificadores, o LCS indutivo não inviabiliza o funcionamento da linha em caso de falha interna, e.g. no sistema criogénico. Os custos e rendimento deste último funcionam também como uma vantagem, já que durante a operação normal o SAT não está directamente exposto à corrente sinusoidal do primário e portanto não aquece.

Devido ao uso de ferro no núcleo, os LCS indutivos têm pesos e volumes consideráveis, tal como acontece com os transformadores. Além disso, a limitação pode dar-se com base na transição S/N (supercondutor/normal) do SAT, o que faz retomar o problema do amortecimento, da formação de pontos quentes e degradação do material caso a transição não seja homogénea. Por esta razão, também nestes limitadores se usam, por vezes, ligações *shunt* no SAT para ajudar o amortecimento homogéneo. Por último, passando o SAT ao seu estado normal, resistivo, este fica sujeito a aquecimento o que implica um tempo de recuperação do dispositivo após falha. Apesar de não ser tão longo como nos limitadores resistivos, é algo a ter em conta como aspecto menos positivo.

Podem ser encontrados vários exemplos de projectos desde tipo de limitador, usando diferentes topologias nos núcleos e para diferentes aplicações, contudo o mais importante e de maior sucesso foi o projecto levado a cabo pela *ABB Corporate Research* e *ABB High Voltage Technologies*. Trata-se de um LCS trifásico indutivo, ou de blindagem magnética de 1,2 MVA de potência com as características da Tabela 2.11, cujo elemento supercondutor consiste numa pilha de anéis cerâmicos maciços feitos de Bi-2212 (Figura 2.50), reforçados com bandas de aço, que não só servem de reforço contra tensões mecânicas no cerâmico como também de *shunt* para facilitar o amortecimento e evitar a formação de pontos quentes. O seu núcleo de ferro aberto tem uma massa total de 1300 Kg. Os ensaios de curto-circuito trifásicos revelaram eficácia na limitação de correntes presumidas de 60 kA para cerca de 700 A no primeiro meio ciclo e para 250 A ao fim de 50 ms. O sucesso dos ensaios efectuados confirmaram os resultados de simulação, o que levou à instalação do dispositivo numa linha auxiliar de 10,5 kV da central hidroeléctrica “Kraftwerk am Löntsch”, na Suíça, em Novembro de 1996, tendo sido o primeiro equipamento supercondutor a ser ensaiado numa central eléctrica sob condições de operação reais (Figura 2.51). O sucesso do projecto levou os seus autores a acreditar que o equipamento era escalável para 10 MVA, antecipando uma primeira aplicação comercial (Paul, Lakner et al., 1997, Paul and Chen, 1998).

Tabela 2.11 – Características do LCS indutivo de 1,2 MVA da ABB. Construído a partir de (Paul and Chen, 1998)

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Altura do SAT	8 cm
Diâmetro do SAT	38 cm
Espessura do SAT	1,8 mm
Temperatura de operação	77 K
Tensão Nominal	10,5 kV
Corrente Nominal	70 A
Corrente máxima do SAT	32 kA
Máxima corrente de operação	28 kA
Perdas térmicas	10 W @ 77 K
Perdas AC	40 W @ 77 K
Tempo de recuperação	2-10 s

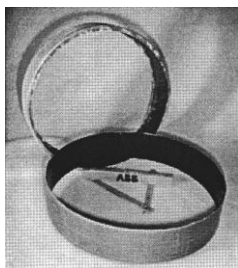
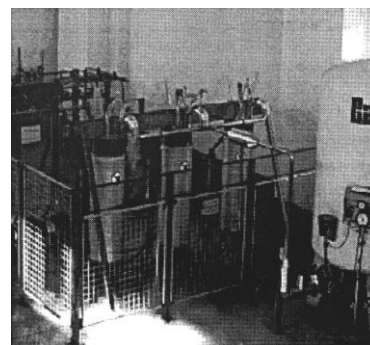


Figura 2.50 – Anéis cerâmicos de Bi-2212 utilizados do LCS da ABB de 1,2 MVA. Retirado de (Paul, Lakner et al., 1997).

Figura 2.51 – LCS trifásico de 1,2 MVA instalado numa linha auxiliar da central hidroeléctrica de “Kraftwerk am Löntsch”, na Suíça. Retirado de (Paul, Lakner et al., 1997).



Uma vez que este é exactamente o tipo de limitador desenvolvido na parte experimental deste trabalho, este será acompanhado até ao fim da dissertação, no qual serão ainda abordados os modelos associados, considerações sobre as topologias dos núcleos no uso de diferentes tipos de núcleos, entre outras.

2.3.3 Núcleos de Ferro Saturados ou Núcleos de Ferro Polarizados em DC

Este tipo de limitador é composto por dois núcleos de ferro, dois enrolamentos AC, L_1 e L_2 , ligados em série com a linha a ser protegida, um enrolamento DC supercondutor e uma fonte de tensão DC (Figura 2.52). As polaridades das ligações das bobinas AC são tais que em qualquer instante, os fluxos ligados de origem AC e de origem DC têm sentidos opostos no núcleo de ferro. Em funcionamento normal, a corrente de linha i_{linha} é suficientemente baixa para que a fonte de tensão DC garanta a corrente de excitação necessária à bobina DC para saturar o núcleo de ferro. Os enrolamentos AC oferecem então a baixa indutância de saturação, o que se traduz numa queda de tensão também muito reduzida e portanto sem efeitos adversos em regime normal de operação. A impedância equivalente do dispositivo é dada essencialmente pela série destas duas impedâncias, tratando-se praticamente apenas da resistência dos enrolamentos AC. No caso de uma falha, i_{linha} aumenta e leva os núcleos a perder a saturação alternadamente num ciclo, aumentando a impedância total do limitador, dada pela reactância saturada de uma das bobinas somada à impedância da outra que entrou na zona da curva de magnetização correspondente a uma elevada permeabilidade magnética. Como consequência, dá-se um aumento na queda de tensão aos terminais das bobinas L_1 e L_2 , limitando assim a corrente de curto-circuito (Raju, Parton et al., 1982).

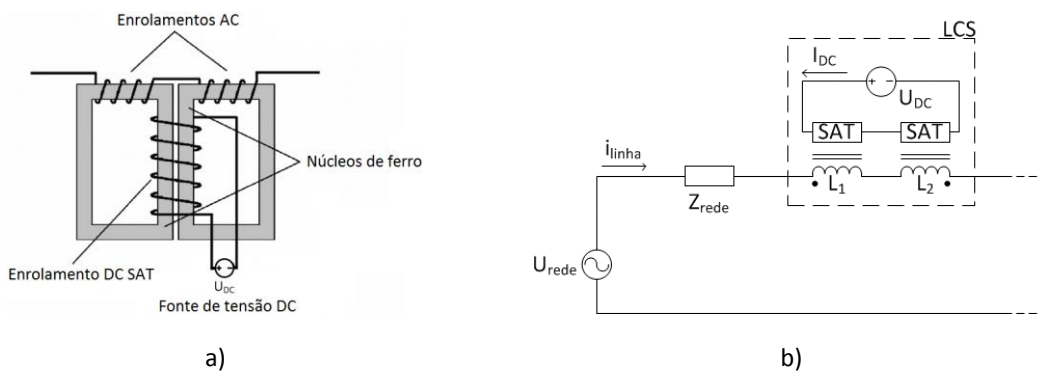


Figura 2.52 – a) Diagrama esquemático de um LCS de núcleos saturados ou polarizados em DC. Adaptada de (Hui, Zhengjian et al., 2009).

b) Esquema eléctrico de um LCS de núcleos saturados ou polarizados em DC.

A Figura 2.53 ajuda a compreender o princípio de funcionamento deste LCS. A linha central a tracejado representa o comportamento de uma bobina num circuito magnético não polarizado. Quando uma polarização DC é aplicada num circuito magnético, as bobinas AC nos núcleos 1 e 2 passam a ter os comportamentos representados lateralmente, a tracejado. O comportamento magnético do dispositivo é dado pela série, i.e. soma, dos dois anteriores, assumindo a característica representada na linha contínua

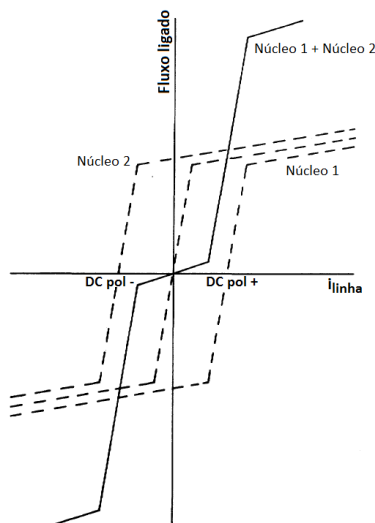


Figura 2.53 – Princípio de operação do LCS de núcleos saturados ou de núcleos polarizados em DC. Adaptado de (Raju, Parton et al., 1982).

À semelhança do que se passa no LCS rectificador, o elemento SAT nestes limitadores não sofre transição de estado, pelo que a recuperação do dispositivo após uma falha é imediata. O facto de bobina SAT ser percorrida por corrente DC e não estar conectada directamente à linha, minimiza a quantidade de material SAT necessária, bem como o tamanho e potência do sistema criogénico, já que as perdas DC no SAT são nulas e este não sofre aquecimento. Além disso, uma falha interna no dispositivo, e.g. no sistema criogénico, não invalida o funcionamento normal da linha. Contudo, devido à necessidade do núcleo de ferro, o dispositivo é algo pesado e volumoso. Por outro lado, são de evitar correntes induzidas na bobina DC devido ao fluxo do ferro durante a fase de limitação. Neste sentido, existem variantes desta topologia onde a componente DC é desacoplada por meio de comutadores de rápida transição, durante a fase da limitação, como é o caso do exemplo que se segue.

Um projecto demonstrativo desta tecnologia foi desenvolvido na China pela *Innopower*, e consiste num LCS trifásico de núcleos saturados de 35 kV/90 MVA (Figura 2.54). Este LCS, cujas especificações gerais se resumem na Tabela 2.12, usa uma bobina supercondutora DC feita de BSCCO2223/Ag (Figura 2.55a) que abraça o núcleo de forma hexagonal. As inovações na topologia do núcleo e na introdução de uma unidade de controlo por computador do circuito de magnetização DC (Figura 2.55b) permitiu-lhes contornarem algumas das desvantagens

normalmente apontadas a este tipo de limitadores. Projectado para limitar correntes de curto-circuito até 50%, o sucesso dos seus ensaios levou à sua instalação numa linha de transmissão de 35 kV na subestação de Puji, na China, em Dezembro de 2007 (Figura 2.56). Em 2009 foram efectuados ensaios de curto-circuito tendo sido limitadas em 43,5% correntes de falha de 63,9 kA. Os resultados destes e outros ensaios, bem como os seus tempos de reacção à falha, levam os seus autores a considerá-lo encorajador, aproximando-se de um comportamento ideal e prevendo aplicação comercial num futuro próximo (Xin, Hong et al., 2011).

Tabela 2.12 – Especificações gerais do LCS de núcleos saturados de 35 kV/90 MVA. Adaptado de (Yin, Gong et al., 2009)

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Altura	4,2 m
Diâmetro	4 m
Peso	27 t
Tensão nominal	35 kV
Corrente nominal	1,5 kA
Máxima corrente de curto-circuito esperada	41 kA
Corrente limitada máxima	25 kA
Máxima queda de tensão na linha	< 1%
Tempo de detecção de falha	< 1 ms
Tempo de reacção	< 5 ms
Comprimento total de fita SAT	17600 m
Saída DC	350 A/50 V

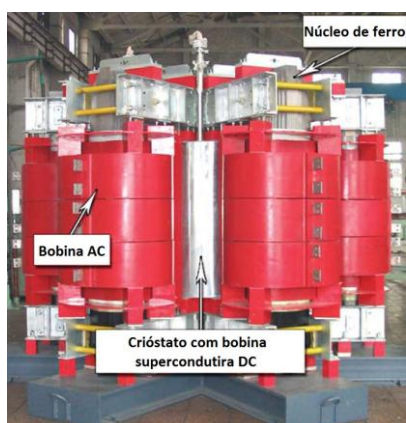


Figura 2.54 – Limitador trifásico de núcleos saturados de 35 kV/90 MVA, desenvolvido pela Innopower. Adaptado de (Yin, Gong et al., 2009).



a) Bobina supercondutora DC.



b) Fonte de tensão e unidade de controlo do sistema de magnetização DC.

Figura 2.55 – Elementos DC no LCS de 35 kV/90 MVA da Innopower, incluindo a bobina e unidade de controlo. Retirado de (Hui, Zhengjian et al., 2009)

Figura 2.56 – LCS de núcleos saturados de 35 kV/90 MVA instalado numa linha de transmissão de 35 kV na subestação de Puji, na China. Retirado de (Yin, Gong et al., 2009).



2.3.4 Outros Tipos

Serão seguidamente abordados, de forma mais superficial, outros tipos de LCS indutivos, de carácter menos relevante que os dois vistos anteriormente. São eles o tipo híbrido, o de captura de fluxo e os transformadores com núcleo de ar.

2.3.4.1 Híbrido

Tal como o nome indica, este tipo de LCS sugere uma mistura de outros tipos, nomeadamente o resistivo e o indutivo. Assim, a limitação é garantida por elementos SAT que transitam para o estado normal na presença de correntes superiores à crítica, mas a ligação dos mesmos à linha não é feita electricamente, em série, mas sim magneticamente através de um transformador (Figura 2.57). Um projecto demonstrativo é o documentado em (Granados, Puig et al., 2002), que trata de um LCS híbrido de 400 kVA cujos elementos resistivos usados na limitação eram tiras de YBCO (Figura 2.58). Este provou o uso do transformador como alternativa robusta de acoplamento de elementos SAT na linha a proteger.

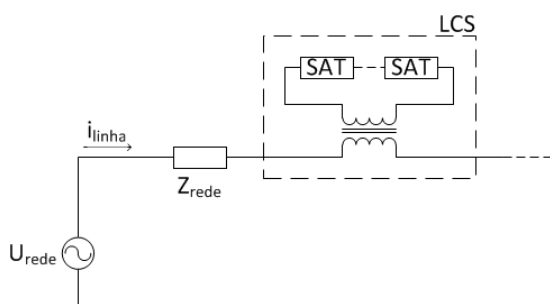
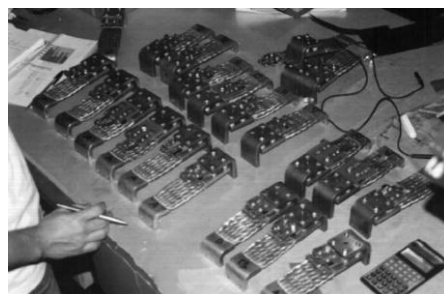


Figura 2.57 – Esquema eléctrico de um LCS híbrido.

Figura 2.58 - Elementos resistivos compostos por tiras de YBCO, a usar no LCS híbrido de 400 kVA. Retirado de (Granados, Puig et al., 2002).



É importante referir que na literatura o termo limitadores de corrente híbridos é muitas vezes usado para tecnologias que implementem outras misturas que não só os resistivos e indutivos. Uma possibilidade é a combinação de tecnologias supercondutoras com equipamentos eléctricos convencionais, como interruptores, fusíveis, bobinas com núcleo de ar, dispositivos de electrónica de potência, entre outros. Como referência a exemplos deste tipo pode consultar-se (Lee, Park et al., 2008) ou (Jin Bae, Young Jae et al., 2012).

2.3.4.2 Captura de Fluxo

O limitador do tipo captura de fluxo, em inglês "*Flux-Lock Type*", é constituído por duas bobinas magneticamente ligadas por um núcleo de ferro e um elemento SAT (Figura 2.59). O

elemento SAT está ligado em série com a segunda bobina, que por sua vez está ligada em paralelo com a primeira. As duas bobinas estão ligadas de modo a produzirem fluxos em sentidos contrários. As tensões u_1 e u_2 aos terminais das bobinas são dadas genericamente por:

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.18)$$

$$u_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.19)$$

Sendo N_1 e N_2 o número de espiras das bobinas 1 e 2 e ϕ o fluxo magnético que circula no circuito magnético limitado pelo núcleo de ferro. Assim, em operação normal o material SAT está no seu estado supercondutor, apresentando resistividade e quedas de tensão nulas, o que faz com que as bobinas estejam ligadas directamente em paralelo e portanto:

$$u_1 = u_2 \quad (2.20)$$

Assumindo que $N_1 + N_2 \neq 0$, então conclui-se que, não havendo variação de fluxo, não há queda de tensão aos terminais das bobinas, estando o fluxo capturado num modo DC. A impedância do dispositivo é por isso desprezável, contabilizando somente o fluxo de dispersão.

No caso de falha, a corrente aumenta, levando o SAT a perder a supercondutividade. Este ganha resistência e a equação (2.20) deixa de ser válida, já que o fluxo magnético ϕ passa a variar no tempo e são induzidas tensões nas bobinas, gerando-se uma impedância que limita a corrente de falha. O nível de limitação pode ser ajustado através da indutância das bobinas, i.e., alterando o seu número de espiras.

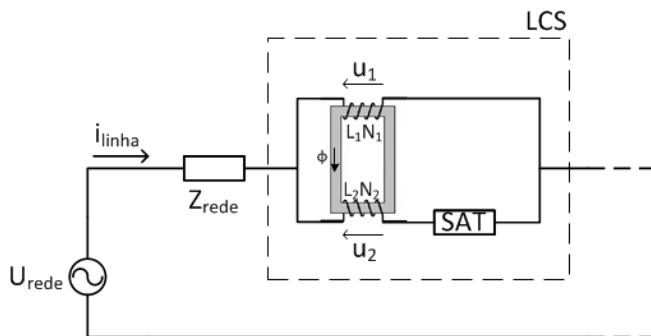


Figura 2.59 – Diagrama esquemático de um LSC do tipo captura de fluxo.

Uma vez que a limitação envolve a transição de estado do SAT, algumas variantes desta topologia incluem um terceiro enrolamento em torno do núcleo, somente com a função de, durante a limitação, levar uma corrente a percorrer uma bobina para assistir o amortecimento do SAT, evitando a formação de pontos quentes (Sung-Hun, Il-Kyoung et al., 2011). Contudo, não existem aplicações de elevada potência deste tipo de limitador.

2.3.4.3 Com núcleo de Ar

Estes tipo de limitadores pode ser vistos como uma variante dos anteriores, ou até dos do tipo transformador, mas sem núcleo de ferro, i.e., no seu lugar está ar. São normalmente constituídos por duas bobinas concêntricas cujos fluxos se anulam em condições de operação normal, ao contrário da condição de falha, em que o aumento da corrente faz transitar a segunda bobina (feita de material SAT) para o estado normal, criando a impedância necessária para a limitação. À semelhança do caso anterior, também não existem aplicações de potência relevantes, já que neste caso as indutâncias criadas são ainda menores devido à ausência do ferro. Fica no entanto uma referência que compara diferentes topologias deste tipo de limitadores (Shimizu, Yokomizu et al., 2004).

2.3.5 Conclusão

Nesta secção apresentaram-se os diferentes tipos de limitadores indutivos, enfatizando principalmente o tipo indutivo, de blindagem magnética ou transformador, e o de núcleos de ferro saturados, ou núcleos polarizados em DC. São estes os mais importantes e com aplicações de potência em condições reais de operação mais significativas. No entanto, foram ainda abordadas outras topologias, menos relevantes, como é o caso dos híbridos, dos de captura de fluxo e dos de núcleo de ar. As vantagens e desvantagens comparativas foram referidas aquando da sua descrição.

2.4 Conclusão

Este capítulo foi dedicado ao estado da arte da supercondutividade, passando pelas propriedades e fenómenos inerentes, tipos de supercondutividade e aplicações em geral, particularizando depois para os dispositivos limitadores de corrente. Sobre estes, foi feita uma comparação entre as soluções convencionais e as supercondutoras, onde as últimas se mostraram promissoras, já que satisfazem algumas das premissas que se esperam de um limitador de corrente ideal. Posto isto, foram sugeridas as aplicações mais benéficas de LCSs numa rede de energia, onde se concluiu que estes são úteis em diversos locais numa rede,

quer de MT quer de AT. Não só no campo dos LCSs, é consensual que as soluções baseadas na supercondutividade apresentam desempenhos muito além dos dispositivos convencionais. Contudo, a barreira imposta à sua implementação não é de cariz tecnológico mas sim económico. Os largos anos de aperfeiçoamento e habituação à fiabilidade dos dispositivos convencionais impõe por si só uma barreira psicológica à mudança, particularmente na aceitação de tecnologias relativamente recentes e pouco cimentadas.

Ao serem discutidos os diferentes tipos de LCS, os indutivos em mais detalhe, comprovou-se que algumas aplicações mostraram ser promissoras ao funcionarem eficazmente sob condições de operação reais em redes de energia eléctrica. Este tipo de aplicações, principalmente no que diz respeito aos tipos resistivo, indutivo (blindagem magnética) e rectificador, aproximam as respectivas tecnologias de potenciais aplicações comerciais, caminhando para uma abertura do mercado à supercondutividade de larga escala. Até lá, alguns aspectos têm de ser melhorados, nomeadamente a sua integração com os dispositivos convencionais existentes, redução dos custos de instalação, melhoria sistemas criogénicos, diminuição do peso/volume, entre outros. Todavia, uma constante evolução tecnológica nesta área permitirá a diminuição dos custos dos materiais e aparatos necessários, o que permitirá a penetração de mercado das aplicações da supercondutividade.

Apesar da tentativa em contrário, este capítulo apresenta-se algo extenso, dado a vasta abrangência do tema. Ainda assim, evitou-se o estudo das teorias da supercondutividade e da modelização de materiais, bem com os seus tipos, propriedades, métodos de fabrico, entre outros. Desde 1986 foi estimada a publicação de mais de 50 000 artigos científicos relacionados com a supercondutividade, número que aumenta constantemente dada a fugaz actividade no sector. Assim, este capítulo oferece apenas uma modesta visão sobre o tema, tendo-se focado nos aspectos e resultados mais relevantes para o trabalho desenvolvido.

3 Construção do Limitador de Corrente

3.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à metodologia seguida na construção e montagem do limitador de corrente indutivo, ou de blindagem magnética, alvo do trabalho experimental desta dissertação. Serão focados os vários elementos constitutivos do limitador, nomeadamente os núcleos de ferro usados, elemento SAT e bobinas AC, bem como as razões que levaram às opções e dimensionamentos efectuados.

Num projecto de um limitador indutivo, levado a cabo de raiz, os parâmetros decisivos no seu desempenho são o número de espiras do primário e as dimensões do cilindro SAT, i.e. altura, diâmetros interno e externo e espessura. As dimensões do núcleo de ferro adoptado são projectadas da mesma forma que no caso dos transformadores, contudo, isso deve ser feito de modo a que o núcleo fique imediatamente antes da saturação no caso de ocorrência de uma falha. Isto maximiza a ligação magnética entre o primário e o secundário e otimiza a quantidade de ferro utilizada. Teoricamente, o campo induzido no SAT, a frequência da rede e a distância entre o núcleo e o cilindro são os dados necessários para o dimensionamento de todo o núcleo e cilindro SAT, em que é crucial garantir que este último fica no estado supercondutor para a corrente nominal de linha. O número de espiras é então determinado pela tensão nominal. O facto do núcleo de ferro só ser percorrido por fluxo magnético em caso de falha faz com que não haja a necessidade de usar ferro da melhor qualidade, poupando-se nos seus custos. No entanto, continua a ser essencial que este seja composto por chapas, para evitar as indesejadas correntes de Foucault. Como visto anteriormente, o núcleo de ferro não tem obrigatoriamente de ser fechado, já que a ligação magnética oferecida por um núcleo aberto geralmente é suficiente.

Estas são as indicações sugeridas em (Paul and Chen, 1998) para o projecto e dimensionamento de LCS do tipo indutivo, conforme o construído em laboratório. Contudo,

apesar de alguns aspectos terem sido levados em conta, esta metodologia não foi seguida à risca, maioritariamente devido a condicionantes laboratoriais ou ao nível do material. Por outro lado, algum do material já existia no laboratório, proveniente de trabalhos anteriores, nomeadamente os núcleos de ferro, cilindro SAT e suportes para as bobinas. O objectivo foi então construir um modesto modelo de limitador de corrente indutivo, ou de blindagem magnética, à escala laboratorial, a fim de se poderem realizar ensaios experimentais de limitação de corrente de curto-circuito e analisar o seu desempenho e características.

3.2 Núcleos de Ferro

O núcleo de ferro assume um papel fulcral no desempenho do limitador de corrente, já que é a sua característica magnética que está na base do comportamento dinâmico do LCS, como se terá oportunidade de perceber mais adiante. Como já foi referido, o LCS indutivo pode usar um núcleo de ferro fechado ou aberto, pelo que foram usados quatro núcleos diferentes: um fechado e três abertos. O núcleo fechado possui três colunas verticais de igual secção, dispostas entre duas travessas horizontais, enquanto os núcleos abertos têm formato cilíndrico, todos de igual secção, variando apenas no comprimento (Figura 3.1). Os núcleos são naturalmente constituídos por chapas de ferro, para que se evite a formação de correntes de Foucault quando é percorrido por fluxo de indução magnética. O aspecto real dos núcleos pode ser visto na Figura 3.2.

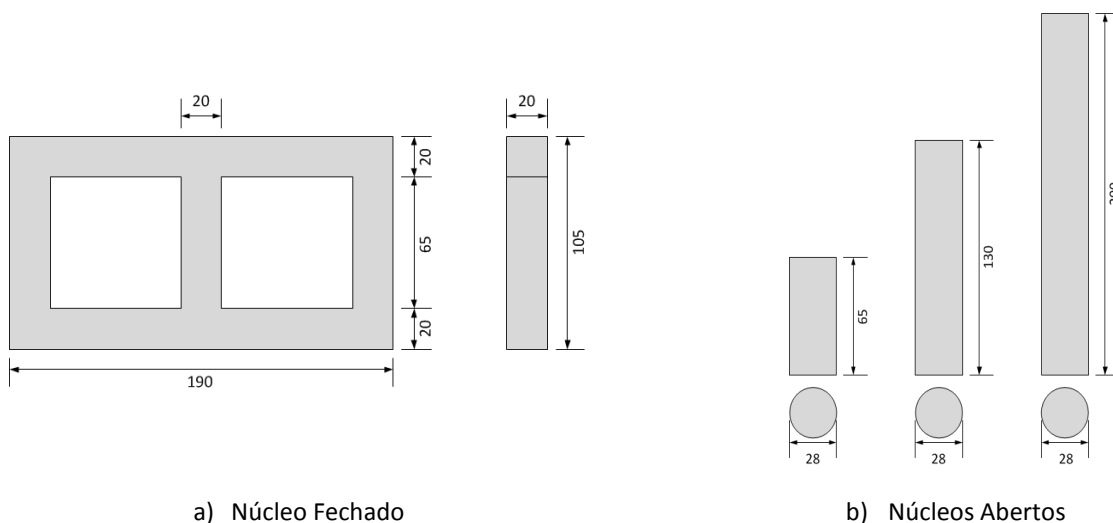


Figura 3.1 – Formato e dimensões (em milímetros) dos núcleos de ferro.



Figura 3.2 – Aspecto real dos núcleos de ferro utilizados no LCS indutivo.

3.3 Elemento SAT

O elemento supercondutor desempenha um papel igualmente importante na construção do limitador. Este é um cerâmico de forma cilíndrica, feito de BI-2223, uma material supercondutor comum do Tipo II, incluindo-se na categoria dos SATs. As suas características apresentam-se na Tabela 3.1, e o seu aspecto real é ilustrado na Figura 3.3. Dado o seu carácter cerâmico, e às condições a que é submetido durante a operação, i.e. variações de temperaturas, correntes elevadas, forças de Lorentz (Kozak, Janowski et al., 2006), o elemento é frágil e necessita de cuidados acrescidos na sua utilização.

Tabela 3.1 – Características do elemento SAT utilizado no LCS.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Fabricante	CAN Superconductors
Referência	CST-33/48.1
Temperatura crítica	108 K
Raio interno	16,5 mm
Espessura	2,5 mm
Altura	48 mm
Corrente crítica @ 77 K	360 A

Figura 3.3 – Cilindro SAT usado no LCS indutivo construído.



3.4 Construção das Bobinas

A bobina do primário é a que está ligada em série com a linha a ser protegida e é responsável por criar o fluxo magnético que, em caso de falha, penetra o núcleo de ferro para limitar a corrente de curto-circuito. Uma vez que o cilindro SAT vai sentir a força magnetomotriz dada por $N_1 i_{linha}$, em que i_{linha} é a corrente de linha, ou corrente do primário, que atravessa a bobina, esta deve ser dimensionada de modo a que o SAT não perca a supercondutividade a não ser em circunstâncias de falha. É então necessário considerar o valor da corrente crítica, I_{C_SAT} no dimensionamento de N_1 . A primeira bobina efectuada mostrou ter demasiadas espiras, pelo que uma pequena corrente i_{linha} já levava o SAT ao estado normal, impossibilitando a análise sob curto-circuitos. Uma segunda bobina foi então construída com $N_1 = 58$ espiras.

Considerando $I_{C_SAT} = 360$ A, valor dado pelo fabricante, teoricamente o supercondutor começa a perder a supercondutividade a partir de $N_1 i_{linha} = I_{C_SAT}$, o que resulta em:

$$i_{linha} = \frac{I_{C_SAT}}{N_1} = \frac{360}{58} = 6,2 \text{ A} \quad (3.1)$$

Esta é uma estimativa grosseira para validar o número de espiras dimensionado, prevendo-se então que o dispositivo só irá limitar para correntes superiores a 6,2 A. O número de espiras foi confirmado através de um pequeno circuito onde se impunha uma corrente conhecida, i_p , na bobina construída, registando a leitura da corrente total $N_1 i_p$ dada por uma bobina de Rogowski que abraçava a primeira (Figura 3.4).

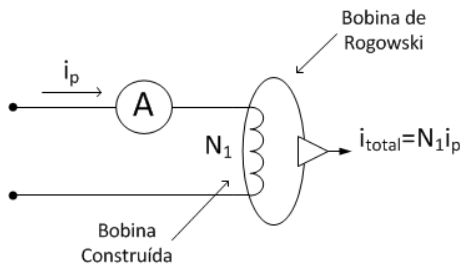


Figura 3.4 – Método para confirmação do número de espiras do enrolamento primário.

As bobinas foram enroladas num molde de baquelite, uma resina sintética resistente térmica e mecanicamente, pouco sensível a variações volumétricas com a temperatura (Figura 3.5). Os moldes tiveram de ser manualmente desbastados no seu raio interno, para permitir o

encaixe do cilindro no seu interior. Os enrolamentos foram feitos manualmente, tão densamente quanto possível, de modo a minimizar os fenómenos de dispersão. As bobinas tomam o aspecto final da Figura 3.6, sendo que somente a de menor número de espiras foi utilizada em ensaios experimentais válidos.



Figura 3.5 – Moldes de baquelite usados na construção das bobinas.

Figura 3.6 – Aspecto final das bobinas construídas. Somente a de menor número de espiras foi utilizada em ensaios válidos.



3.5 Montagem do Limitador.

Reunidos todos os componentes necessários, resta combiná-los na montagem final do limitador. O cilindro está encaixado dentro da bobina do primário, conjunto este que abraça a coluna vertical central do núcleo de ferro, como ilustra o esquema da Figura 3.7. O aspecto real do limitador é o da Figura 3.8. Este é o limitador completo para o caso do núcleo fechado, pronto a ser ensaiado em condições normais e de curto-circuito, onde a linha a proteger é ligada em série à bobina do primário. No caso dos núcleos abertos a topologia é a mesma.

Dado o carácter frágil do tubo SAT, este é envolvido em gaze para suavizar o encaixe dentro da bobina, já que este fica preso entre ela e o núcleo. Isto protege o supercondutor de potenciais vibrações que se possam fazer sentir, não só provenientes das próprias forças que actuam no supercondutor, como também das vibrações das chapas do núcleo durante as situações de falha em que a corrente de linha é grande, e por conseguinte também o fluxo magnético que circula no ferro. Além disso, outros cuidados laboratoriais com este elemento foram tomados, nomeadamente o evitar de choques térmicos, arrefecendo-o previamente com recurso somente a vapores frios, limpeza e eliminação da humidade que se gera após voltar à temperatura ambiente, entre outros.

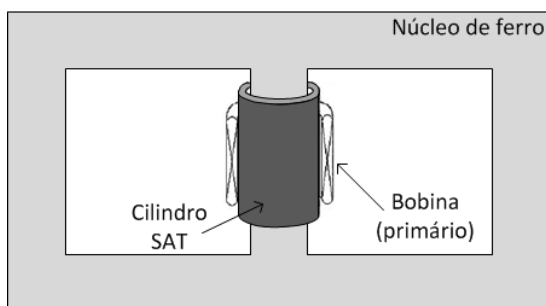
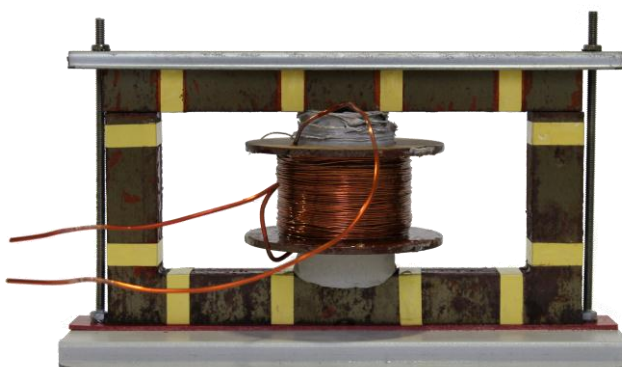


Figura 3.7 – Esquema representativo do LCS indutivo completo.

Figura 3.8 – Aspecto real do LCS indutivo construído.



3.6 Conclusão

Este capítulo apresentou os detalhes de construção do limitador de corrente supercondutor indutivo, particularizando-se primeiramente cada elemento de importância na sua constituição, e no final a montagem completa. Dado o *design* simples deste tipo de LCS, também este capítulo se apresenta bastante sucinto.

4

4 Modelização do Limitador de Corrente

4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à modelização do comportamento dinâmico do LCS, primeiramente recorrendo ao modelo do princípio do transformador e seguidamente a um método baseado na análise da sua característica magnética, proposto em (Pina, 2010). Após introduzido, o modelo é obtido, explicando-se os procedimentos experimentais para o efeito e apresentando-se os resultados. Estes vão sendo comparados com os resultados de simulação apresentados na referência indicada.

4.2 Modelo baseado no Princípio do Transformador

Como já foi referido, o princípio de funcionamento do LCS indutivo apresentado é um transformador, como tal, encontram-se frequentemente na literatura abordagens ao esquema equivalente de *Steinmetz* do transformador para modelizar o comportamento dinâmico do LCS (Paul, Baumann et al., 1995, Kozak, Janowski et al., 2004). Este está representado na Figura 4.1, onde o primário diz respeito à bobina de N_1 espiras ligada em série com a linha, e o secundário ao elemento SAT, que está em curto-circuito. As equações do LCS são então dadas por:

$$u_1 = R_1 i_{linha} + \lambda_1 \frac{di_{linha}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{fe}}{dt} \quad (4.1)$$

$$0 = R_{SAT} i_{SAT} + \lambda_{SAT} \frac{di_{SAT}}{dt} + N_{SAT} \frac{d\phi_{fe}}{dt} \quad (4.2)$$

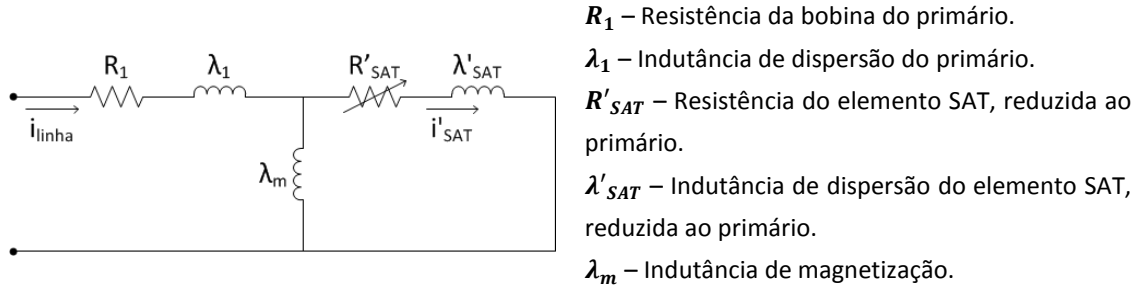


Figura 4.1 – Esquema equivalente de Steinmetz do LCS e respectivos parâmetros constituintes.

O secundário, por se tratar de um cilindro maciço, apresenta-se como tendo apenas uma espira, ou seja, $N_{SAT} = 1$. Por este motivo, a razão de transformação vem:

$$m = \frac{N_1}{N_{SAT}} = N_1 \quad (4.3)$$

A resistência do SAT está assinalada no esquema como variável, já que depende da temperatura, corrente e campo magnético, alterando o seu valor em caso de falha. Devido a (4.3), as grandezas do lado do secundário vêm:

$$R'_{SAT} = R_{SAT} \cdot m^2 = N_1^2 \cdot R_{SAT} \quad (4.4)$$

$$\lambda'_{SAT} = \lambda_{SAT} \cdot m^2 = N_1^2 \cdot \lambda_{SAT} \quad (4.5)$$

$$i'_{SAT} = \frac{i_{SAT}}{m} = \frac{i_{SAT}}{N_1} \quad (4.6)$$

Em (Paul, Baumann et al., 1995) este modelo é desenvolvido de modo a concluir que a topologia do núcleo e os seus parâmetros constitutivos podem influenciar a natureza da corrente limitada, i.e., ela pode ser maioritariamente indutiva, resistiva, ou uma mistura de ambas. No entanto, este modelo não considera histerese nem saturação do ferro, factores que se irão revelar cruciais na predição do seu comportamento dinâmico do limitador e portanto apresenta algumas limitações na modelização dinâmica de LCS deste tipo. É, por essa razão, muito pouco usado em aplicações práticas.

4.3 Modelo baseado na Característica Magnética do LCS

A melhor forma de simular o comportamento dinâmico destes dispositivos é recorrendo a *software* de modelização por elementos finitos (*Finite Elements Modeling - FEM*), como é exemplo o *Flux2D*³ da empresa *Cedrat*. Os modelos calculados por estes *softwares* são realmente fiáveis, contudo, envolvem tempos de processamento muito elevados, tornando-se impraticável a simulação de dispositivos à escala real integrados em redes de energia complexas como as dos dias de hoje. Nesse sentido, uma metodologia proposta por (Pina, 2010) surge no sentido de modelar e simular os LCSs de blindagem magnética em redes complexas e à escala real, minimizando os tempos de simulação de tal forma que estes se tornam praticamente irrelevantes.

A metodologia proposta baseia-se na obtenção das características magnéticas do limitador para prever o seu desempenho, já que se comprovou que o seu comportamento dinâmico é limitado por um mesmo ciclo de histerese máximo do limitador. O objectivo é então obter este ciclo de histerese máximo do LCS, que relaciona a corrente de linha do primário com o fluxo ligado do LCS, e para isso é necessário determinar a corrente máxima do supercondutor, I_{SAT}^* , que é uma característica chave na limitação da corrente e bem diferente do valor de corrente crítica, I_C . A outra característica chave é a característica magnética do ferro com o primário, i.e., o ciclo de histerese do núcleo de ferro, que relaciona o fluxo ligado ψ_0 com a corrente de linha i_{linha} . Esta relação é modelizada matematicamente por (4.7) (Pina, 2010), onde N_1 é o número de espiras do primário e os parâmetros a , b , c e d são determinados por ajuste, tendo por base dados experimentais ou de simulação:

$$\psi_0(i_{linha}) = aN_1i_{linha} + \frac{bN_1i_{linha}}{c + dN_1|i_{linha}|} \quad (4.7)$$

A construção do ciclo de histerese máximo do limitador é feita recorrendo às características chave referidas anteriormente, de acordo com as expressões que se seguem (Pina, 2010), correspondendo à construção da Figura 4.2.

$$\lambda_a(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} - f(i_{linha})) \quad (4.8)$$

$$\lambda_d(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} + f(i_{linha})) \quad (4.9)$$

³ <http://www.cedrat.com/en/software/flux.html>

$$f(i_{linha}) = \frac{I_{SAT}^*/N_1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{I_{SAT}^*/N_1}{I_{CC}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{i_{linha}}{I_{CC}}\right) \quad (4.10)$$

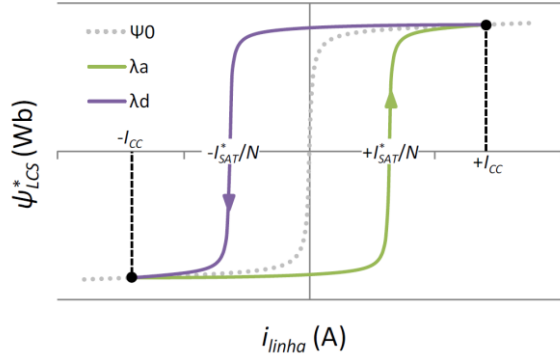


Figura 4.2 – Modelo do ciclo de histerese máximo do LCS indutivo. Retirado de (Pina, 2010).

Obtido um ciclo semelhante ao da Figura 4.2, é necessário um método para simulação dinâmica de um circuito incluindo o LCS. Este método, baseado em métodos iterativos, foi desenvolvido e explicado detalhadamente em (Pina, 2010). As metodologias propostas foram validadas por resultados de simulação devolvidos pelo software de elementos finitos.

4.4 Obtenção do Modelo

A secção que se segue visa a obtenção dos modelos dinâmicos dos limitadores descritos no capítulo 3, para os diversos núcleos de ferro, segundo a metodologia proposta na secção 4.3. Dado que isso será feito com base em resultados experimentais, serão tecidas, sempre que relevante, comparações com os resultados obtidos por simulação. O trabalho desenvolvido não inclui a obtenção de quaisquer resultados de simulação, pelo que todas as simulações apresentadas foram retiradas de (Pina, 2010).

4.4.1 Corrente Máxima do Supercondutor

Tal como foi visto na secção anterior, primeiramente é necessário obter o valor de corrente máxima do SAT, I_{SAT}^* , já que teoricamente a limitação terá início em I_{SAT}^*/N_1 , como mostra a Figura 4.2.

4.4.1.1 Resultados de Simulação

Os resultados de simulação para este parâmetro foram obtidos através de *Flux2D*, recorrendo a uma bobina de $N_1 = 350$ espiras percorrida por uma corrente máxima de 120 A, o que resulta numa força magnetomotriz (FMM) de 42 kA. O elemento SAT foi modelado recorrendo ao modelo de Bean (secção 2.1.4, equação (2.14)). O patamar de corrente máxima do SAT estabelece-se para $I_{SAT}^* = 694$ A (Figura 4.3), valor próximo do dobro da corrente crítica do SAT (360 A).

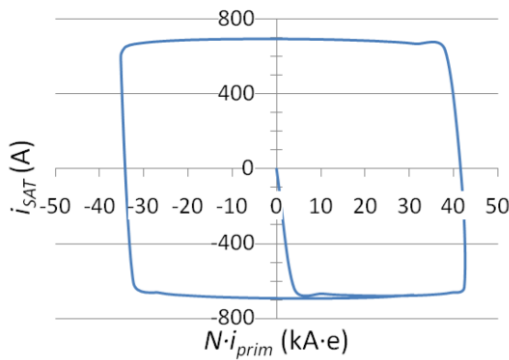


Figura 4.3 – Corrente máxima do SAT, obtida por simulação, $I_{SAT}^* = 694$ A. Retirado de (Pina, 2010).

4.4.1.2 Resultados Experimentais

Para a determinação da corrente máxima induzida no SAT usou-se a montagem ilustrada na Figura 4.4, em que o cilindro encaixa dentro da bobina, sem núcleo de ferro. A bobina é alimentada com corrente alternada de valor conhecido e ao passar pelas suas N_1 espiras, cria um fluxo magnético sentido pelo SAT. Uma vez que este está mergulhado em azoto líquido, enquanto no estado supercondutor, o cilindro irá induzir correntes de blindagem de modo a impedir que as linhas de fluxo o penetrem, sendo o valor máximo destas correntes de blindagem criadas no supercondutor o que se pretende obter. A corrente do primário, i_p , é obtida em cada instante através da queda de tensão aos terminais de uma resistência de amostragem de 1Ω e a corrente total, i_T , é lida através de uma bobina de Rogowski (Ward and Exon, 1993) que abraça o conjunto. Ambas as leituras são registadas em tensão com recurso a um osciloscópio, sendo os dados tratados posteriormente. Com a bobina de Rogowski obtém-se assim $i_T = i_{SAT} + N_1 i_p$, pelo que a corrente do SAT é dada matematicamente por:

$$i_{SAT} = i_T - N_1 i_p \quad (4.11)$$

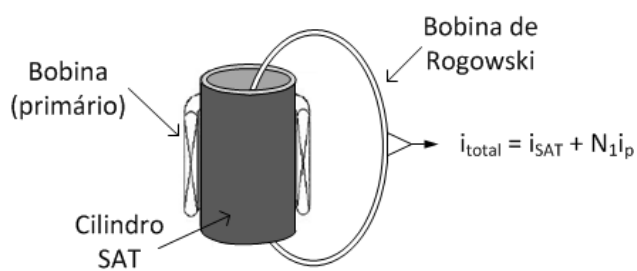


Figura 4.4 – Esquema ilustrativo do método para medição da corrente máxima do SAT.

Antes de se fazerem os ensaios experimentais, cujo aspecto em laboratório pode ser visto na Figura 4.5, foram efectuados ensaios de medição usando a bobina de Rogowski para garantir que esta não introduzia desfasagem nem outros erros que comprometessem a validade dos dados.

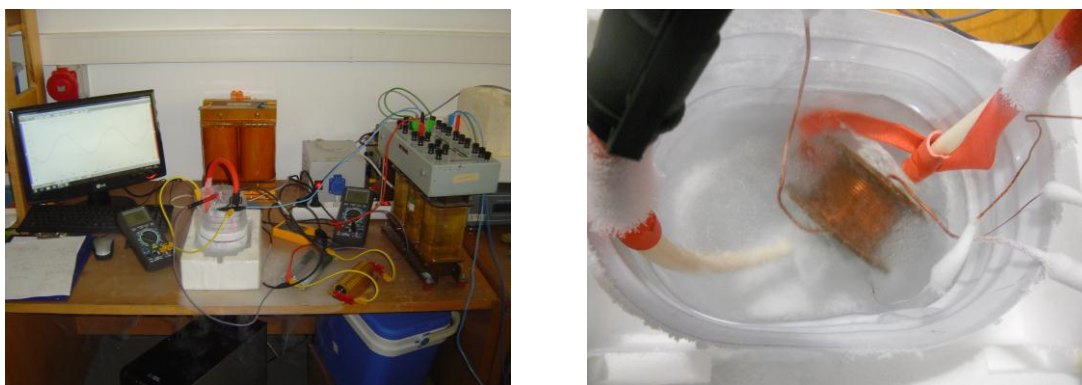


Figura 4.5 – Ensaio experimental da característica do SAT em laboratório. Vista completa e pormenor.

Num primeiro ensaio, foram obtidos vários conjuntos de dados experimentais correspondentes a valores pontuais crescentes de corrente do primário, até cerca de 10 A_{ef}, correspondendo a uma FMM de 820 A·espira, para $N_1 = 58$. Os resultados, ilustrados na Figura 4.6, mostram que abaixo dos **340 A·espira**, a força magnetomotriz criada pelo primário é cancelada praticamente na sua totalidade pelas correntes de blindagem induzidas no SAT. Neste caso, o andamento de i_{SAT} em função de $N_1 i_p$ é praticamente uma recta de declive -1. A partir daí, o SAT deixa de ter capacidade de continuar a acompanhar o crescimento da FMM e começa a permitir a penetração de fluxo. Isto significa que é a partir deste ponto que a impedância do dispositivo irá começar a aumentar, i.e., o início da limitação. Este valor corresponde à corrente crítica I_c e não está muito longe dos 360 A indicados pelo fabricante, o que leva a que haja limitação a partir de uma corrente de linha superior a $i_p = 340/58 = 5,86 \text{ A}$, também não muito longe do previsto na secção 3.4, aquando do dimensionamento das bobinas.

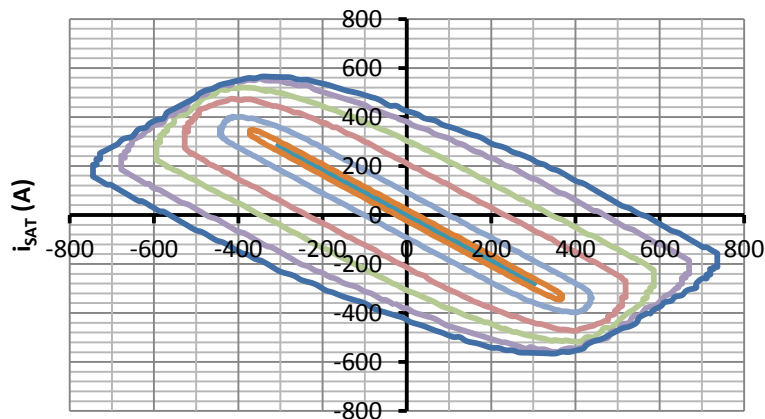
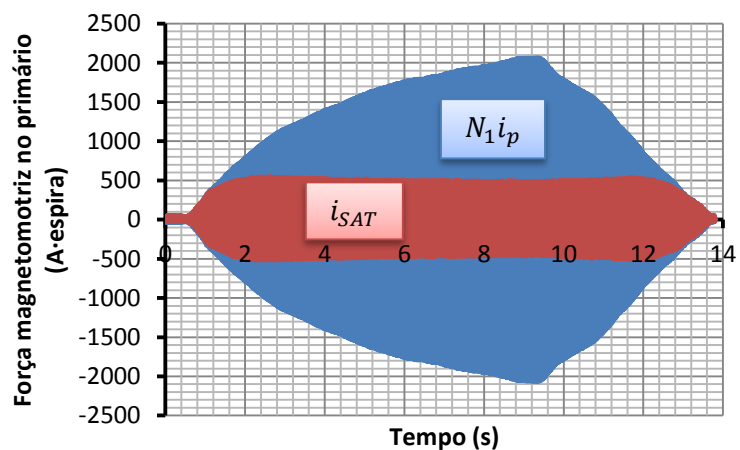


Figura 4.6 – Correntes de blindagem induzidas no cilindro em função da força magnetomotriz do primário.

Força magnetomotriz no primário (A·spira)

Um outro ensaio foi realizado a fim de se obter efectivamente a corrente máxima do SAT. Neste caso, a aquisição de dados foi feita de forma contínua, enquanto se aumentava progressivamente a alimentação do primário. Os resultados obtidos, ilustrados na Figura 4.7, confirmam o que foi concluído da figura anterior e mostram que a corrente no SAT satura num valor máximo próximo dos 560 A, sendo este o valor experimental obtido para a corrente máxima do supercondutor, i.e., $I_{SAT}^* = 560 \text{ A}$.

Figura 4.7 – Corrente no SAT, i_{SAT} e força magnetomotriz no primário, $N_1 i_p$, no tempo.



O facto de se registarem 14 segundos de dados torna a referida figura em duas manchas, sendo impossível distinguir a forma sinusoidal das correntes. No entanto, enquanto o SAT faz a blindagem perfeita do fluxo, as manchas estão sobrepostas pois ambas as correntes apresentam a mesma amplitude, apesar de estarem em oposição de fase. Quando o SAT deixa de conseguir opor-se à penetração do fluxo, i.e. acima de I_{SAT}^* , as duas manchas tornam-se distintas, onde a FMM continua a aumentar, ao contrário da corrente do SAT. Com

o aumento da FMM vai surgindo progressivamente alguma desfasagem, o que explica os ciclos de histerese formados na Figura 4.6. Por esta razão, achou-se interessante traçar a variação da desfasagem entre i_{SAT} e $N_1 i_p$, indicada como $\varphi(i_{SAT}, N_1 i_p)$, em função da FMM (Figura 4.8). Uma vez mais, os resultados confirmam o comportamento do SAT antes e depois dos referidos valores, como explicado anteriormente. A linha a tracejado marca a referência da desfasagem de 180° , i.e. oposição de fase, situação que se verificaria sempre se o SAT fosse capaz de cancelar toda a FMM gerada pelo primário, independentemente do seu valor.

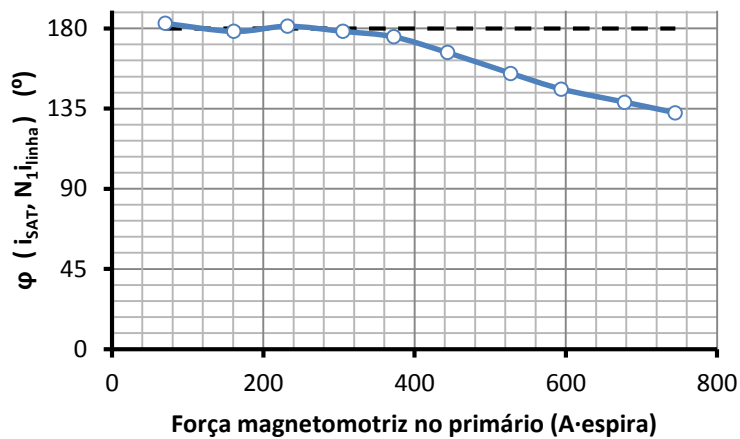


Figura 4.8 – Variação da desfasagem entre a corrente do SAT e a forma magnetomotriz do primário, em função da última.

4.4.1.3 Comparações

Comparando os resultados experimentais obtidos com os previstos em simulação, são visíveis algumas diferenças importantes, nomeadamente no que diz respeito às características do SAT evidenciadas na Figura 4.3 e Figura 4.6. De acordo com o simulado, a variação de corrente no SAT era prevista acontecer entre dois valores extremos, $\pm I_{SAT}^*$, quando na realidade constatou-se que esta ocorre segundo um ciclo de histerese, derivado da desfasagem introduzida entre as duas grandezas, à medida que este vai perdendo a capacidade de blindar completamente a FMM do primário. Isto permite concluir que existem fenómenos que não estão a ser considerados nas simulações. Uma possibilidade pode ser o facto de estas considerarem a densidade de corrente do SAT independente da densidade de fluxo magnético, quando na verdade existe dependência entre eles. Por outras palavras, o carácter simplista do modelo de Bean utilizado nas simulações efectuadas pode estar na base das diferenças relativamente aos dados experimentais.

Por esta razão, já no âmbito desta dissertação, efectuaram-se novas simulações, idênticas às apresentadas em (Pina, 2010), mas recorrendo a diferentes modelos para modelização do elemento SAT. Assim, efectuaram-se simulações no *Flux2D*, mantendo o mesmo primário, i.e. $N_1 = 350$ espiras, percorrido por correntes de valor crescente de 5 A,

10 A e 15 A. A grande diferença está na forma de modelização do SAT, em que se recorreu ao modelo de Kim (secção 2.1.4.1, equação (2.15)), aplicado à Lei da Potência E-J (secção 2.1.4.2, equação (2.16)). Fica assim descrita uma dependência entre o campo eléctrico, a densidade de corrente e a densidade de fluxo, coisa que não acontecia quando era utilizado o modelo de Bean. Após algumas simulações fazendo variar os parâmetros das equações que descrevem os modelos, obteve-se a simulação da Figura 4.9, que consegue aproximar os resultados de simulação com os experimentais.

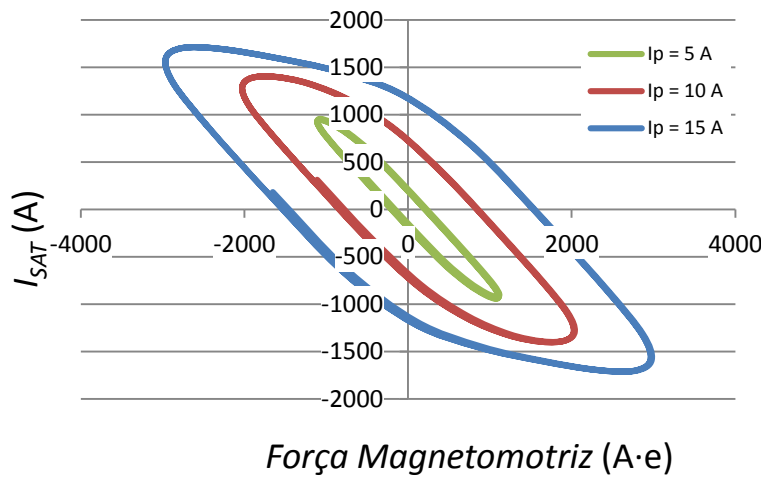


Figura 4.9 - Correntes de blindagem induzidas no cilindro SAT, obtidas por simulação, recorrendo ao modelo de Kim e Lei da Potência E-J.

Na variação dos parâmetros do modelo, constatou-se que a forma das curvas é afectada essencialmente pelo valor de referência do expoente, n_0 e pelo parâmetro da densidade de fluxo crítica do expoente, B_i , ambos parâmetros de cálculo do expoente n na lei da potência E-J, de acordo com:

$$n(B) = \frac{n_0}{1 + \frac{B}{B_i}} \quad (4.12)$$

Nesse sentido, o ideal seria conseguir-se modelizar matematicamente esta característica partindo dos dados obtidos experimentalmente, i.e. extrair cada um dos parâmetros constituintes do modelo. Isso teria certamente de considerar a desfasagem entre as grandezas, responsável pela forma da curva, daí o interesse dos resultados da Figura 4.8.

4.4.2 Características Magnéticas dos Núcleos de Ferro

Conhecida a característica do SAT, pretende-se agora obter a característica magnética dos núcleos de ferro, já que esta é paralela aos ramos do ciclo de histerese máximo do limitador, como mostra a Figura 4.2.

4.4.2.1 Resultado de Simulação

Os resultados de simulação para este parâmetro foram obtidos através de *Flux2D*, alimentando a bobina do primário com $N_1 = 350$ espiras e medindo-se o fluxo ligado, na ausência de elemento SAT. A Figura 4.10 apresenta os resultados de simulação correspondentes às características magnéticas dos quatro núcleos, i.e., o fluxo ligado com o primário em função da corrente que o atravessa. Para cada característica foi efectuado um ajuste por recurso à ferramenta *cftool* do Matlab, a fim de se obter os coeficientes numéricos da expressão (4.7), os quais não se achou necessidade de apresentar.

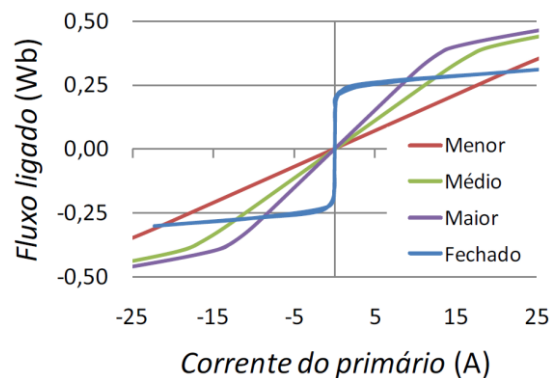


Figura 4.10 – Características magnéticas dos quatro núcleos de ferro, um fechado e três abertos de diferentes comprimentos. Retirado de (Pina, 2010).

4.4.2.2 Resultados Experimentais

Para se obter experimentalmente a característica do núcleo de ferro, i.e., o seu ciclo de histerese, é necessário que se observem independentemente um do outro a corrente do primário (corrente de magnetização) e o fluxo no ferro. Para isso, usa-se a montagem da Figura 4.11, onde a bobina do primário abraça o núcleo de ferro, sem SAT, sendo alimentada por uma corrente sinusoidal. Esta corrente atravessa uma resistência de amostragem (Figura 4.13a), cuja queda de tensão aos seus terminais é lida por um osciloscópio e não é mais do que uma imagem da corrente de magnetização do primário que se pretende registar. Para obter o seu valor real basta então fazer:

$$i_p = \frac{u_a}{R_a} \quad (4.13)$$

Para a leitura do fluxo, foi necessário um enrolamento auxiliar, colocado sobre o primário, que abraça de igual forma o núcleo de ferro e no qual será induzida uma tensão u_2 dada por:

$$u_2 = r_2 i_2 + \lambda_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{fe}}{dt} \quad (4.14)$$

Onde ϕ_{fe} é o fluxo no ferro e r_2 , i_2 , λ_2 e N_2 são respectivamente a resistência, a corrente, o coeficiente de auto-indução relativo à dispersão e o número de espiras do enrolamento auxiliar, identificado com o índice '2'. Uma vez que este enrolamento está em vazio, a sua tensão é dada apenas pelo último termo, onde o fluxo no ferro é criado pelo enrolamento primário. A expressão (4.14) vem então simplificada:

$$u_2 = N_2 \frac{d\phi_{fe}}{dt} \quad (4.15)$$

$$\phi_{fe} = \frac{1}{N_2} \int u_2 \cdot dt \quad (4.16)$$

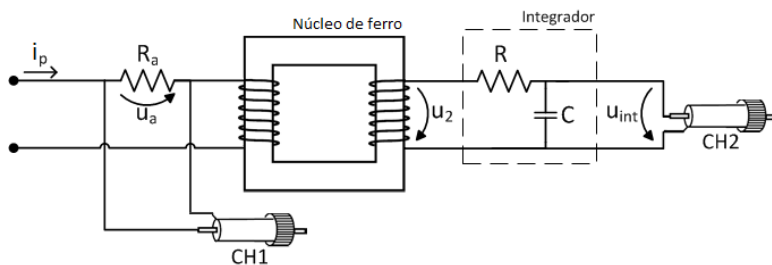
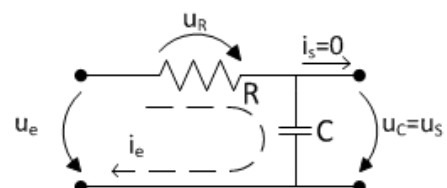


Figura 4.11 – Esquema da montagem realizada em laboratório para obtenção da característica magnética dos núcleos de ferro.

Assim, uma imagem do fluxo no ferro observa-se através da integração da tensão u_2 , induzida no enrolamento auxiliar. O integrador desempenha aqui um papel importante e deve ser dimensionado adequadamente. O seu circuito é o da Figura 4.12. É necessário garantir que o integrador tenha uma impedância de entrada elevada para que se possa considerar que o enrolamento auxiliar ao qual ele é ligado continua em vazio.

Figura 4.12 – Esquema eléctrico do circuito do integrador.



Com a saída do integrador em vazio, não há corrente de saída i_s e a corrente de entrada i_e percorre R e C , cujas tensões são dadas por:

$$u_R = Ri_e \quad (4.17)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_e \cdot dt \quad (4.18)$$

A tensão de entrada é dada por:

$$u_e = u_R + u_C = Ri_e + \frac{1}{C} \int i_e \cdot dt \quad (4.19)$$

Mas no caso de se verificar $|u_R| \gg |u_C|$, então é legítimo concluir que:

$$u_e \approx u_R = Ri_e \quad (4.20)$$

$$i_e \approx \frac{u_e}{R} \quad (4.21)$$

A tensão de saída, corresponde à tensão de saída do condensador, u_C , portanto, substituindo (4.21) em (4.18) obtém-se a expressão da tensão de saída do integrador, u_S :

$$u_S = \frac{1}{RC} \int u_e \cdot dt = \frac{1}{\tau} \int u_2 \cdot dt \quad (4.22)$$

Onde $\tau = RC$ é a constante de tempo do integrador e a tensão de entrada u_e corresponde à tensão induzida no enrolamento auxiliar, u_2 . Recuperando a expressão (4.15) e substituindo em (4.22), resulta:

$$u_S = \frac{1}{\tau} \int N_2 \frac{d\phi_{fe}}{dt} \cdot dt \quad (4.23)$$

$$u_S = \frac{N_2}{\tau} \phi_{fe}$$

Assim a expressão que se segue dá a relação entre o valor real do fluxo no ferro e a sua imagem em tensão dada pela saída do integrador:

$$\phi_{fe} = \frac{u_s \cdot \tau}{N_2} \quad (4.24)$$

Uma vez que o fluxo no ferro é criado por $N_1 i_p$ e que o fluxo ligado com o primário é dado por $\psi_1 = N_1 \phi_{fe}$, então de (4.24) resulta finalmente, para obtenção do valor real do fluxo ligado com o primário:

$$\psi_1 = \frac{N_1 \cdot \tau}{N_2} u_s \quad (4.25)$$

A condição imposta em regime sinusoidal para que a integração seja válida nestas condições, $|u_R| \gg |u_C|$, conduz a que $\tau \gg 1/\omega$, como se demonstra de seguida.

$$\begin{aligned} |u_R| &\gg |u_C| \\ |R\bar{I}| &\gg \left| \frac{1}{j\omega C} \bar{I} \right| \\ R &\gg \frac{1}{\omega C} \\ \tau &\gg \frac{1}{\omega} \quad \text{ou} \quad \tau \gg \frac{T}{2\pi} \end{aligned} \quad (4.26)$$

A tensão u_2 do enrolamento auxiliar, ao ser integrada, para além de vir reduzida pelo factor τ vem também por ω , pelo que as tensões na saída do integrador são geralmente muito reduzidas, na ordem das poucas dezenas de milivolts. Isto trouxe um problema na leitura das características magnéticas dos núcleos, pois existe um compromisso entre o cumprimento da condição imposta em (4.26) e a amplitude da tensão integrada, de modo que as características do sinal não fossem destruídas pela introdução de ruído e/ou incertezas na leitura. Assim, depois de construídos e ensaiados vários filtros passivos com diferentes constantes de tempo, optou-se por usar um com $R = 1 \text{ M}\Omega$ e $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$, o que resulta numa constante de tempo de

$\tau = 1\text{ s}$, cumprindo a condição imposta, já que $1 \gg 3.18 \times 10^{-3}$. A Figura 4.13a mostra o aspecto real do integrador.

Ainda assim, as tensões de saída eram ainda muito reduzidas e muito vulneráveis a ruído e incertezas, pelo que a solução passou por aumentar o número de espiras do enrolamento auxiliar. Uma vez que este não é percorrido por corrente, não afecta em nada o resto do dispositivo, tendo o número de espiras sido aumentado várias vezes, culminando no valor final de $N_2 = 129$ espiras. A amostragem dos dados também foi um factor a ter em conta, já que uma reduzida amostragem não possibilita a reprodução fiel das formas de onda obtidas. Foram usadas frequências de amostragem aproximadamente entre 12,28 kHz e 195,3 kHz, o que corresponde a entre cerca de 245 e 3900 amostras por período, à frequência da rede. A Figura 4.14 mostra o aspecto dos ensaios levados a cabo no laboratório nesta fase do trabalho.



a) Integrador passivo, $\tau = 1\text{ s}$



b) Resistência de amostragem, $R = 1\ \Omega$

Figura 4.13 – Aspecto do integrador e resistência de amostragem utilizados em laboratório.

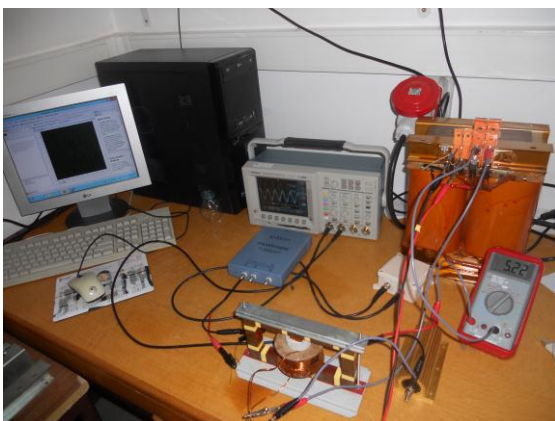


Figura 4.14 – Ensaio experimental da característica magnética do núcleo fechado em laboratório.

Explicada a metodologia experimental adoptada, apresentam-se de seguida os resultados obtidos para as características magnéticas dos quatro núcleos, mostrando o fluxo ligado com o primário, ψ_1 , em função da corrente da bobina que o alimenta, i_p . Estes servem

de base para o ajuste polinomial tendo em conta a expressão (4.7), o qual é conseguido recorrendo à função do Matlab *cftool*, e mostrado juntamente com os respectivos parâmetros e característica anterior. No ajuste, foi imposta a condição de que todos os parâmetros fossem maiores ou iguais a zero. Os resultados são apresentados para o núcleo fechado, aberto menor, médio e maior, da Figura 4.15 até à Figura 4.18, respectivamente.

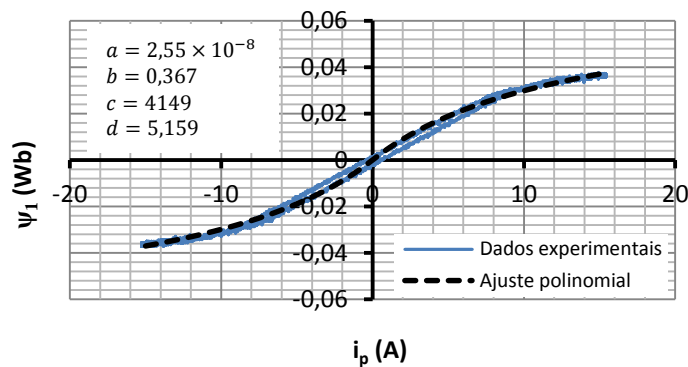


Figura 4.15 – Característica magnética do núcleo fechado.

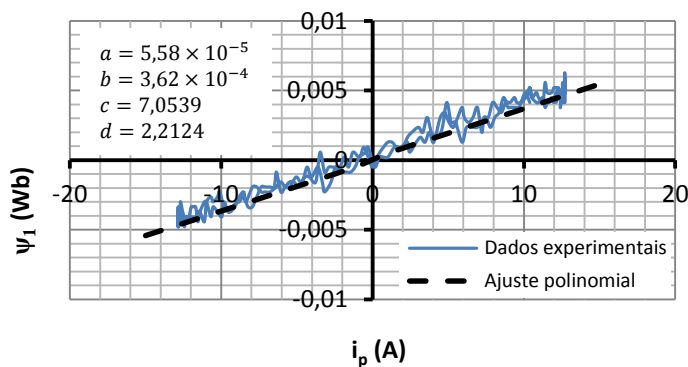


Figura 4.16 – Característica magnética do núcleo aberto de comprimento menor

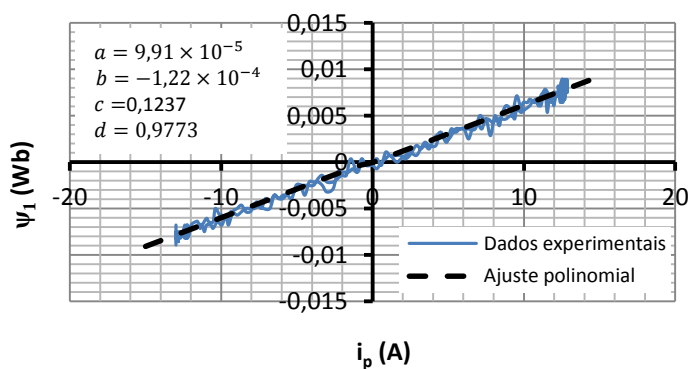


Figura 4.17 – Característica magnética do núcleo aberto de comprimento médio.

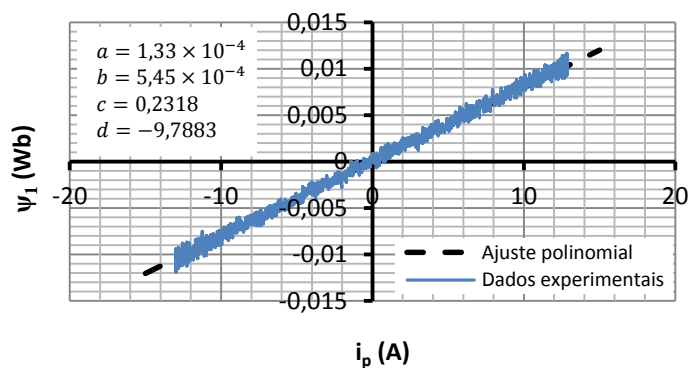


Figura 4.18 – Característica magnética do núcleo aberto de comprimento maior.

Uma vez que durante os ensaios do limitador, todo o sistema é mergulhado em azoto líquido, surgiu a necessidade de verificar se as características magnéticas obtidas se alteravam ou não perante temperaturas criogénicas. Todos os ensaios foram repetidos a temperatura ambiente e a 77 K e não foram detectadas diferenças que justifiquem ser consideradas. Os resultados apresentados dizem respeito aos obtidos à temperatura ambiente.

Observando os dados é possível reparar que o núcleo fechado, o de menor relutância magnética, é o único que começa a entrar na zona de saturação. Nos núcleos abertos a relutância é maior, bem como a dispersão, pelo que a FMM do primário não é suficiente para fazer saturar o núcleo. A fim de comparar os comportamentos dos núcleos abertos, sobrepueram-se as suas características e respectivos ajustes polinomiais na Figura 4.19.

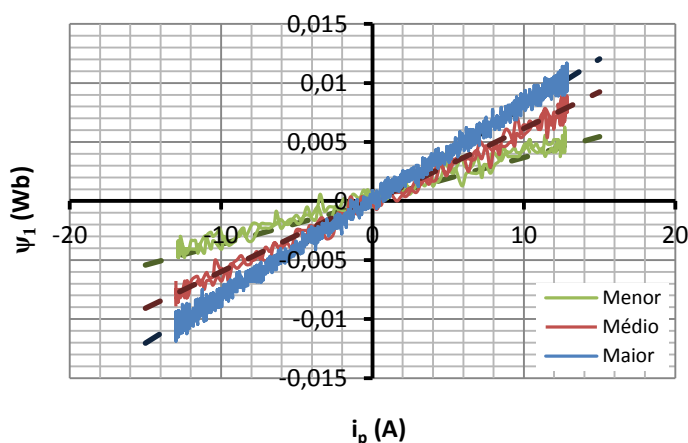


Figura 4.19 – Características magnéticas dos núcleos de ferro abertos.

Observa-se que quanto maior for o comprimento, mais inclinada é a característica, i.e. maior é o seu fluxo ligado com o primário, uma vez que a sua relutância é menor. Por esta razão, os dados retirados para os núcleos menor e médio apresentam-se mais degradados e menos precisos, pois as tensões lidas, imagens do fluxo, são já muito baixas e por isso mais vulneráveis a incertezas e ruídos introduzidos na leitura e aquisição de dados.

4.4.2.3 Comparações

Comparando os resultados experimentais com os previstos em simulação, não existem diferenças de maior a assinalar, nomeadamente quando se compara a Figura 4.10 com a Figura 4.19. Na primeira, que diz respeito às simulações, é possível observar o início da saturação dos núcleos abertos, ao contrário do que acontece nos resultados experimentais. Isto acontece dado as simulações terem recorrido a um primário com um número muito superior de espiras, capaz de gerar maior FMM. De qualquer forma, isso não é um aspecto crítico, estando ambos os resultados em conformidade.

4.4.3 Ciclo de Histerese Máximo do LCS

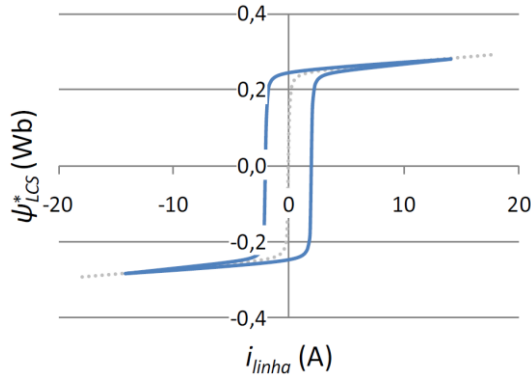
Obtidos os parâmetros anteriores, é possível então construir o ciclo de histerese máximo do SAT. Este será apresentado somente para os resultados de simulação, uma vez que os resultados experimentais dizem respeito ao ensaio do limitador em condições de curto-circuito e estes serão abordados no próximo capítulo. Os ciclos de histerese máximos apresentados na Figura 4.20 para os quatro núcleos de ferro, foram construídos com base na metodologia proposta, i.e., partindo do ajuste polinomial da característica magnética do núcleo e da característica do SAT, todos eles obtidos por simulação em (Pina, 2010). Os resultados experimentais do próximo capítulo pretendem validar os da Figura 4.20, onde o LCS será ensaiado em condições de curto circuito, usando os vários núcleos.

4.5 Conclusões

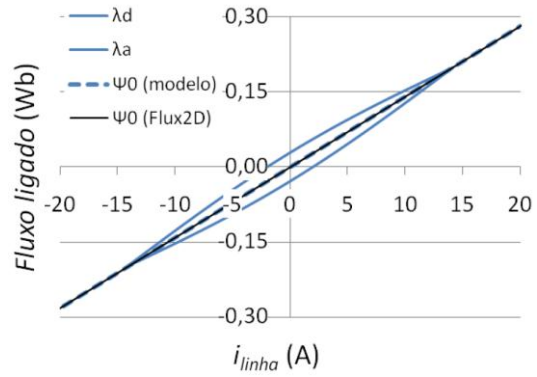
Este capítulo foi dedicado à modelização do comportamento dinâmico dos LCSs indutivos, onde se começou por abordar o modelo baseado no princípio do transformador, recorrendo ao circuito equivalente de *Steinmetz*. Uma vez que este modelo não se revela o mais adequado para o efeito, sendo pouco utilizado, a atenção é focada numa metodologia sugerida por (Pina, 2010) que não só permite prever o comportamento dinâmico dos LCS deste tipo, como fazê-lo em tempos incomparavelmente mais rápidos do que os *softwares* FEM.

Apresentada e explicada a metodologia, foram mostrados os resultados obtidos por simulação e por ensaios experimentais, bem como o aparato desenvolvido necessário à sua execução em laboratório, nomeadamente no que diz respeito às características magnéticas dos núcleos e à característica do elemento SAT. Os resultados teóricos e práticos foram comparados, sempre que possível, bem como as próprias características dos quatro núcleos usados, que se apresentam com algumas diferenças entre si devido à sua diferente topologia.

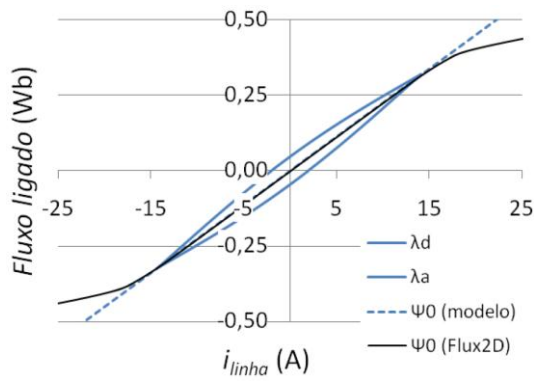
No próximo capítulo, dedicado ao ensaio do limitador sob condições de falha, serão analisados os resultados experimentais com o objectivo de validar os apresentados neste capítulo.



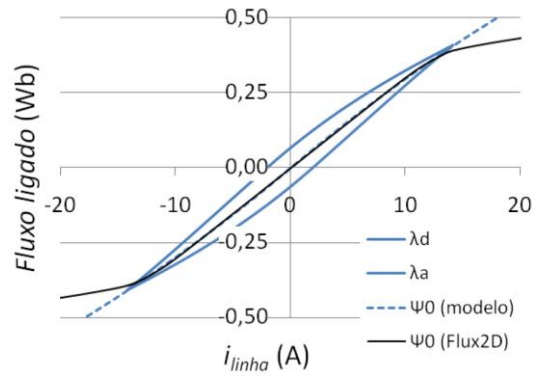
a) Núcleo fechado



b) Núcleo aberto menor



c) Núcleo aberto médio



d) Núcleo aberto maior

Figura 4.20 – Comparação das características magnéticas dos quatro núcleos, simuladas pelo Flux2D, com o ciclo de histerese máximo do LCS para cada núcleo. Retirado de (Pina, 2010)

5 Comportamento Dinâmico do Limitador de Corrente

5.1 Introdução

Este capítulo é dedicado aos ensaios experimentais do LCS indutivo completo em condições de falha. O objectivo é analisar qual o comportamento dinâmico efectivo do limitador, a fim de se comparar com os resultados obtidos por simulação e, consequentemente, inferir acerca da validade da metodologia de modelização proposta no capítulo anterior.

Começa-se então por apresentar os resultados obtidos para o desempenho do LCS por aplicação da metodologia proposta, com base nos resultados de simulação. Seguem-se os resultados experimentais para o mesmo efeito, sem antes abordar algum do aparato experimental necessário para obtenção de todas as grandezas associadas ao comportamento do LCS durante o seu ensaio prático. O processo é repetido para todos os quatro núcleos.

5.2 Simulação do Limitador de Corrente em Condição de Falha

Dados os ciclos de histerese máximos obtidos por simulação, apresentados na Figura 4.20, aplicou-se a metodologia proposta para simulação do comportamento dinâmico do LCS, referida anteriormente na secção 4.3. A sua aplicação retorna essencialmente a evolução da corrente de linha no tempo e a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$, perante uma falha originada pelo curto-circuito de uma impedância resistiva numa rede eléctrica. Todos os curto-circuitos foram efectuados para $t = 20\text{ ms}$.

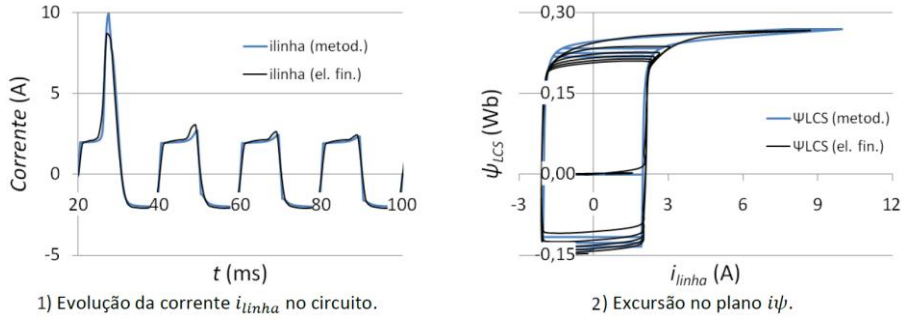
Apresentam-se na Figura 5.1 os resultados de simulação obtidos pela metodologia proposta para quatro núcleos de ferro usados, onde se vêem também os resultados calculados pelo *software* FEM *Flux2D*. Os últimos validam os primeiros, como se comprova em (Pina, 2010).

Analisando os ciclos de histerese obtidos, verifica-se que estes assumem uma forma paralela às características dos núcleos mostradas na secção 4.4.2.1, Figura 4.10, combinadas com a característica da corrente máxima do SAT, evidenciada na secção 4.4.1.1, Figura 4.3, o que resulta numa forma paralela aos ciclos de histerese máximos da Figura 4.20, para os respectivos núcleos. Assim, a forma destes ciclos bem como as diferenças entre eles são justificadas pela forma das características magnéticas dos núcleos de ferro, acerca das quais já foram tecidas considerações na secção 4.4.2. No que diz respeito à evolução da corrente, constata-se que a limitação é maior para o núcleo fechado, diminuindo de desempenho gradualmente do núcleo aberto de maior comprimento até ao menor. Resta portanto obter o equivalente experimental destes resultados.

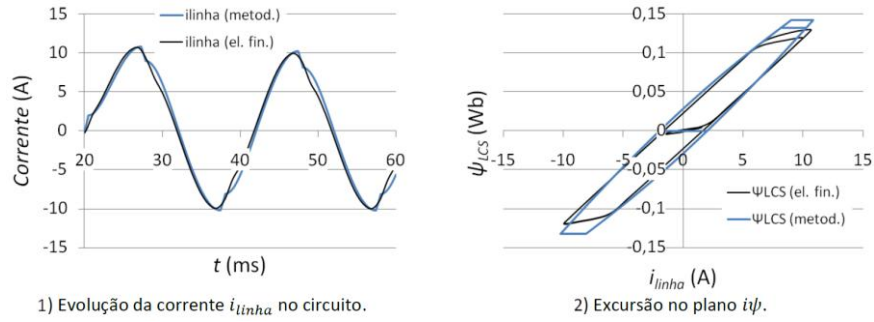
5.3 Montagem Experimental

A fim de se realizar os ensaios experimentais, adquirindo todas as grandezas relevantes, foi necessária a realização de alguma montagem experimental, alvo de atenção nesta secção. Pretende-se ensaiar o LCS ligando-o a uma rede, na qual a determinada altura é simulada uma falha, introduzida através do curto-circuito de uma impedância de carga. O objectivo é estudar o comportamento dinâmico do LCS antes e durante a falha, sendo esta eliminada instantes depois, através da introdução da impedância de volta na rede, i.e., desfazendo o curto-circuito. Posto isto, não basta a observação instantânea de alguns períodos no osciloscópio, já que é necessária a aquisição contínua de dados para que se registem as grandezas de interesse durante todo o referido período de tempo. Neste sentido, foi necessário preparar um sistema de leitura e aquisição de dados com base na placa *NI USB-6009*⁴ (Figura 5.2), cuja resolução é de 14 bits e o ritmo de amostragem de 48k amostras por segundo, que se dividem pelo número de canais usados.

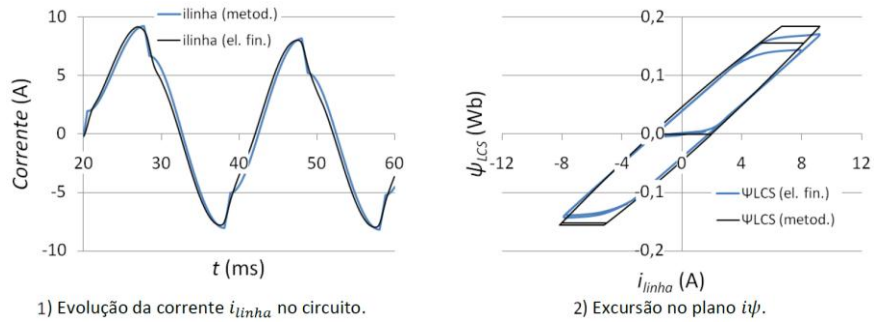
⁴ <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201987>



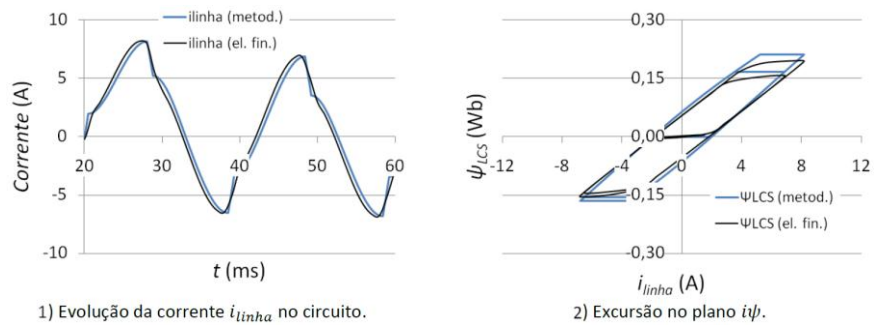
a) Núcleo fechado



b) Núcleo aberto menor



c) Núcleo aberto médio



d) Núcleo aberto maior

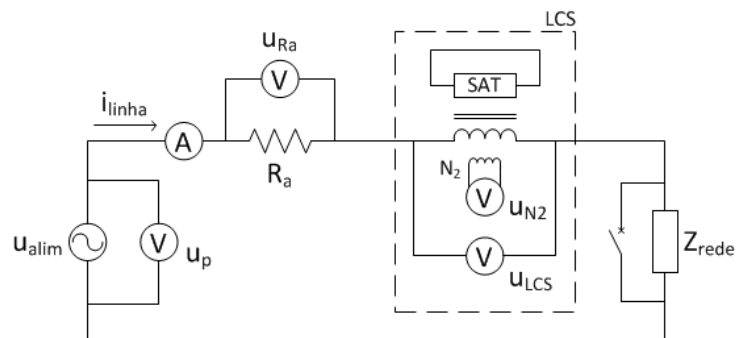
Figura 5.1 – Resultados de simulação do LCS, pela metodologia proposta, para uma impedância de rede resistiva e com uma falha aplicada em $t = 20 \text{ ms}$. Retirado de (Pina, 2010).



Figura 5.2 – Placa de aquisição de dados NI USB-6009. Fonte: http://sine.ni.com/images/products/us/040716_usb6008_m.jpg.

A montagem efectuada em laboratório para o referido ensaio do limitador é a da Figura 5.3, onde estão identificadas as grandezas registadas pelo sistema de aquisição de dados. A tensão monofásica de alimentação, u_{alim} , é uma das grandezas adquiridas, identificada como tensão do primário, u_p . A tensão aos terminais do LCS, u_{LCS} , é também adquirida directamente. As restantes duas grandezas são a corrente de linha i_{linha} e o fluxo ligado do LCS, ψ_{LCS} . À semelhança do que foi feito para obter a característica magnética dos núcleos de ferro (secção 4.4.2.2), estas grandezas são obtidas através das suas respectivas imagens em tensão, quer através da queda de tensão u_{Ra} na resistência de amostragem R_a , quer através da tensão u_{N2} induzida no enrolamento auxiliar de N_2 espiras. Tanto o enrolamento auxiliar como o integrador usado foram os mesmos de anteriormente.

Figura 5.3 – Montagem experimental para o ensaio do LCS em condições de falha.



Uma vez que a placa *NI USB-6009* inserida no sistema de aquisição de dados tem a sua gama de tensão de operação limitada a $\pm 10\text{ V}$ e como é esperado adquirir-se-ão tensões bem superiores a esse valor do decorrer dos ensaios experimentais, é necessário incorporar alguma electrónica no sistema para que as tensões reais possam ser reduzidas, possibilitando a sua leitura sem risco de danificar a placa. Sendo que as grandezas a ler são quedas de tensão, a solução passa por implementar em cada canal de leitura uma montagem amplificadora de diferença (Figura 5.4). Para calcular o ganho da montagem aplica-se o princípio da sobreposição, em que se considera individualmente a soma das contribuições independentes de cada tensão de entrada para o cálculo da tensão de saída v_o . Para $v_{i+} = 0$ vem o ganho da montagem inversora dado em (5.1), e para $v_{i-} = 0$ vem o ganho da montagem não-inversora dado por (5.2), sendo v_o finalmente dado por (5.3).

$$v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{i-} \quad (5.1)$$

$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_+ \quad ; \quad v_+ = v_{i+} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (5.2)$$

$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) v_{i+} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} v_{i+}$$

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = -\frac{R_2}{R_1} v_{i-} + \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} v_{i+} \quad (5.3)$$

Para o caso particular em que $R_2/R_1 = R_4/R_3$, o ganho vem então simplificado:

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{i+} - v_{i-}) \quad (5.4)$$

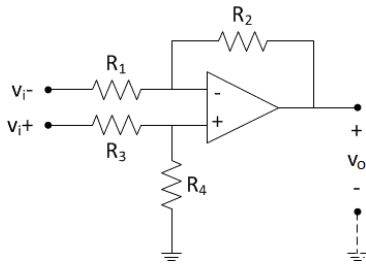
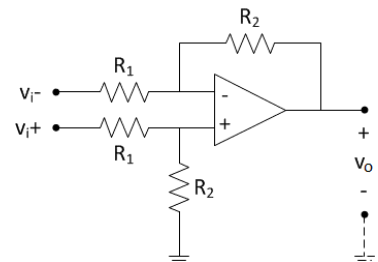


Figura 5.4 - Circuito eléctrico da montagem amplificadora diferencial.

De (5.4) conclui-se que o ganho da montagem é dado pela relação R_2/R_1 , sendo necessário garantir também $R_2 = R_4$ e $R_1 = R_3$. O circuito usado antes dos canais da placa de aquisição de dados fica então simplificado de acordo com o da Figura 5.5.

Figura 5.5 - Circuito eléctrico da montagem amplificadora diferencial usado antes do canal da placa de aquisição de dados.



Dado o circuito, a sua impedância de entrada R_{in} é dada por:

$$R_{in} = 2R_1 \quad (5.5)$$

Isto poderia ser um potencial problema, dado que para ganhos elevados a resistência R_1 seria baixa e consequentemente também a sua impedância de entrada, o que faria com que o circuito consumisse uma corrente considerável durante o seu funcionamento, adulterando a medição que se pretende efectuar. Contudo, este problema não se põe no caso particular dos ensaios efectuados, uma vez que as montagens amplificadoras irão funcionar com ganhos inferiores ao unitário, a fim de proteger a placa de tensões superiores a 10 V. Por outro lado, as resistências usadas para dimensionar o ganho da montagem são da ordem das dezenas ou centenas de $k\Omega$, pelo que serão sempre várias ordens de grandeza superiores às impedâncias encontradas nos ensaios experimentais efectuados (dezenas de Ohm), eliminando assim o problema da baixa impedância de entrada.

Foram assim montados na periferia da placa de aquisição de dados oito canais como os da Figura 5.5, de diferentes ganhos, para serem utilizados conforme necessário. Dois deles são especialmente dedicados às leituras das imagens do fluxo ligado, apresentando por isso um ganho unitário e incluindo na electrónica um integrador passivo de constante de tempo $\tau = 1$ s, exactamente igual ao explicado na secção 4.4.2.2 (característica magnética dos núcleos de ferro). Dado a baixa amplitude das tensões lidas nestes dois canais, estes foram montados recorrendo a resistências de alta precisão. Usou-se o circuito integrado *MC3403N*, que dispõe de quatro amplificadores operacionais alimentados em DC (± 10 V), pelo que foi necessária uma fonte de tensão DC para alimentar o sistema de aquisição de dados, para além da própria alimentação da placa que é feita por USB. As características dos canais montados apresentam-se na Tabela 5.1, e a Figura 5.6 mostra o aspecto real do sistema completo, incluindo a fonte de alimentação. O sistema interage com o *software Labview*⁵, que permite visualizar as grandezas em tempo real e fazer a aquisição contínua dos dados no tempo, entre outras funcionalidades.

⁵ <http://www.ni.com/labview/pt/>

Tabela 5.1 – Características dos canais de aquisição de dados.

Canal	Ganho	Observação
AI0, AI1, AI3	1/4.55	-
AI2, AI6	1	Inclui integrador passivo, $\tau = 1\text{ s}$
AI4, AI7	1/8.3	-
AI5	1/16.67	-

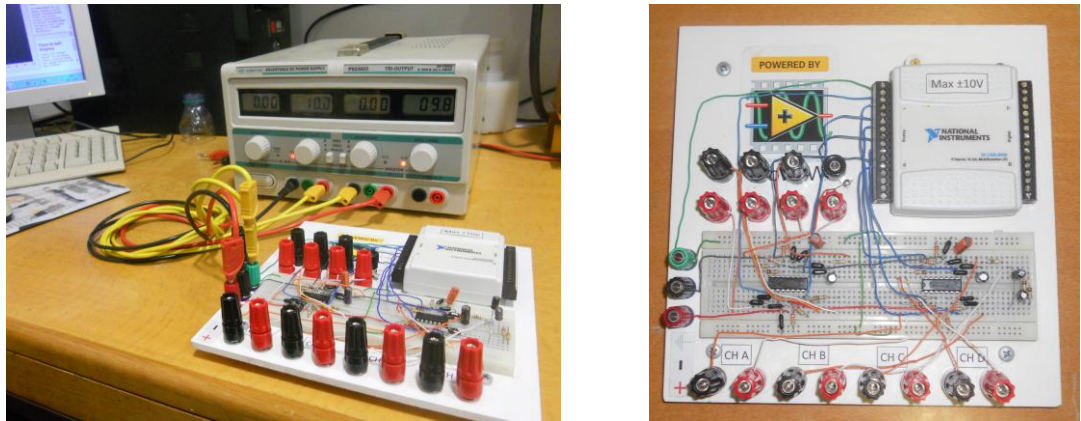


Figura 5.6 – Sistema de aquisição de dados incluindo a fonte de alimentação DC, à esquerda.

Uma das funcionalidades que o *software* permite é a implementação de filtros digitais para aplicação nos dados adquiridos. A fim de serem atenuados os ruídos e de se diminuir o efeito das incertezas de leitura a que estão sujeitas as grandezas observadas, introduzidos não só pela placa de aquisição de dados como também pela electrónica utilizada nos canais, foi implementado um filtro digital passa-baixo. Este filtro, cuja característica em frequência está representada na Figura 5.7, apresenta uma frequência de corte nos 200 Hz, para que as componentes de alta frequência sejam atenuadas sem adulterar as formas de onda registadas à frequência da rede, 50 Hz. Assim, as todas grandezas adquiridas pelo sistema de aquisição de dados sofreram a actuação deste filtro, pelo que todos os resultados apresentados daqui por diante têm por base os dados filtrados.

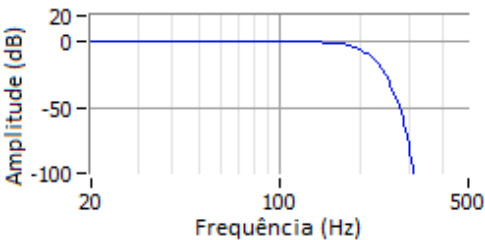


Figura 5.7 – Característica em frequência do filtro implementado por *software* na aquisição de sinais.

5.4 Ensaio do Limitador

Explicado o sistema usado para a aquisição dos dados, seguem-se então os resultados obtidos nos ensaios experimentais dos LCSs em condições de falha. Dada a montagem da Figura 5.3, importa ainda especificar as características de algum do equipamento usado. A tensão u_{alim} é fornecida pelo secundário de um transformador de potência, cujo primário é alimentado por um autotransformador variável. O transformador de potência de 400 V/120 V (Figura 5.8), para além de fazer o isolamento galvânico da rede em ensaio, permite o aumento da corrente disponível no secundário que alimenta o circuito até um máximo de 41,7 A. O autotransformador variável, cuja corrente máxima é 10 A, nunca poderia ser ligado directamente para alimentar o circuito, já que em situação de falha a corrente de linha ultrapassa esse valor.



Figura 5.8 – Transformador de potência de 400 V/120 V, 12,5 A/41,7 A utilizado nos ensaios experimentais.

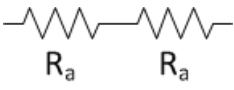
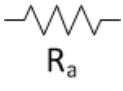
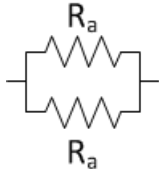
A resistência de amostragem R_a é de aproximadamente $1,1 \Omega$ e a impedância resistiva da rede Z_{rede} (curto circuitada durante a falha) é de 9Ω . Todos os ensaios são realizados com $u_{alim} = 40 V_{ef}$. Este valor foi apurado fazendo uns cálculos simplistas de modo a obter-se uma corrente de linha em condições normais abaixo da crítica, cujo valor foi estimado para 6,2 A aquando da construção das bobinas (3.4) e confirmado para 5,86 A pela característica experimental do SAT (4.4.1.2). Assim, desprezando a resistência dos enrolamentos, a impedância equivalente da rede ronda os 10Ω , o que para $u_{alim} = 40 V_{ef} = 40 \cdot \sqrt{2} V$ resulta numa corrente de linha de $i_{linha} = 5,6 A$, valor abaixo do mínimo para o qual se inicia uma potencial limitação por parte do dispositivo. Na verdade este é ainda menor, quando considerada a resistência dos enrolamentos e os valores exactos das resistências usadas.

Em situação de falha, Z_{rede} é curto-circuitada pelo que a impedância equivalente é dada apenas pela resistência de amostragem R_a , em série com a impedância introduzida pelo LCS. Para efeitos de avaliação do desempenho do dispositivo, a corrente efectiva da linha será comparada com a corrente presumida, que se trata do valor de corrente que se faria sentir na linha caso o dispositivo limitador não existisse, ou seja, se ele fosse substituído por um fio condutor de resistência desprezável. A corrente presumida i_{pres} é então calculada entrando

em conta apenas com a resistência de amostragem R_a e com a tensão de alimentação $u_{alim} = 40 V_{ef}$.

Cada uma das quatro diferentes topologias ensaiadas usa um núcleo diferente e para cada uma delas foram simuladas falhas com três correntes presumidas diferentes. Tal é feito alterando o valor equivalente da resistência de amostragem, combinando duas resistências R_a iguais, de acordo com a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Diferentes correntes presumidas ensaiadas.

	<i>R_a equivalente</i>	<i>Corrente presumida aproximada</i>
	$R_{a_eq} = 2,2 \Omega$	$i_{pres} = \frac{u_{alim}}{R_{a_eq}} = 25,8 A$
	$R_{a_eq} = 1,1 \Omega$	$i_{pres} = \frac{u_{alim}}{R_{a_eq}} = 51,4 A$
	$R_{a_eq} = 0,55 \Omega$	$i_{pres} = \frac{u_{alim}}{R_{a_eq}} = 102,9 A$

A Figura 5.9 mostra a montagem completa usada para produzir os resultados experimentais que se seguem, para o caso do núcleo fechado.

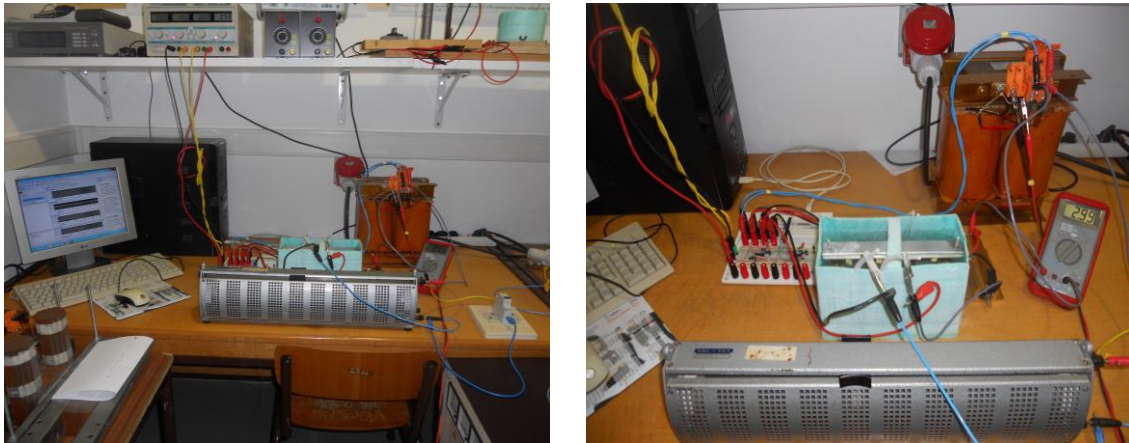


Figura 5.9 – Montagem experimental completa e em pormenor do ensaio do LCS sob condições de falha.

5.4.1 Núcleo Fechado

Seguem-se então os resultados do comportamento dinâmico do LCS por blindagem magnética usando o núcleo fechado, primeiramente para o caso de menor corrente presumida. Para $u_{alim} = 40,1 V_{ef}$ a corrente de linha em condição normal é de $i_{linha} = 2,97 A_{ef}$, o que resulta numa impedância equivalente de $Z_{eq} = 13,5 \Omega$, da qual $2,2 \Omega$ é a resistência de amostragem e 9Ω a impedância Z_{rede} . A corrente de curto-circuito máxima presumida é de $i_{pres} = 25,8 A$. Esta última é curto-circuitada em $t = 60 ms$ para introduzir a falha no circuito.

A tensão aos terminais do LCS aumenta após o curto-circuito, em parte devido ao aumento de corrente, mas também devido ao aumento da impedância do dispositivo. Idealmente, a impedância do dispositivo antes dos 60 ms devia ser nula, sendo o LCS totalmente transparente na rede, contudo, isto não acontece. Existe uma queda de tensão máxima de 2,14 V aos terminais do LCS em condição normal de funcionamento, cerca de 3,8% da tensão de alimentação. Apesar de esta percentagem não ser uma medida directa de perdas, ela é sinónimo de efeitos indesejados, associados e.g. à dispersão e resistência do dispositivo, e tem de ser levada em conta. No entanto, o seu valor não é significativo. Por outro lado, nota-se uma pequena diminuição na tensão de alimentação após o curto-circuito. Isto é devido aos transformadores utilizados que, não sendo ideais, apresentam uma queda de tensão interna distinguível quando a corrente solicitada aumenta muito.

Um conjunto de resultados interessante de analisar é o andamento da corrente de linha i_{linha} comparativamente com a corrente presumida i_{pres} (Figura 5.10). O conceito e forma de cálculo já foram explicados anteriormente.

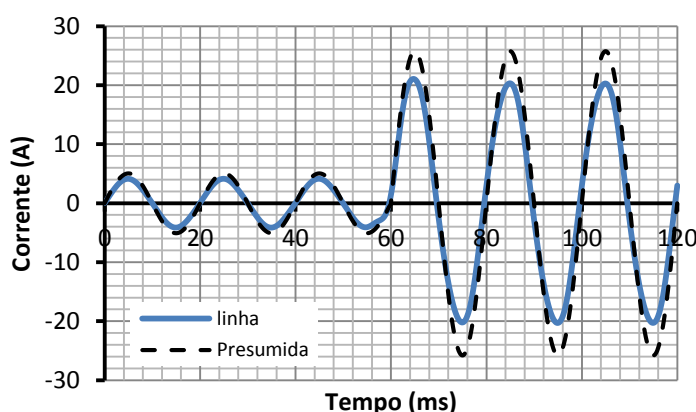


Figura 5.10 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 ms$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 25,8 A$ com núcleo fechado.

Da análise da Figura 5.10 verifica-se que existe efectivamente alguma limitação, já que depois do curto-circuito a corrente na linha é inferior à presumida. Neste ensaio, uma corrente

presumida máxima de 25,8 A foi limitada para 21,04 A no primeiro pico e para 20,08 A nos ciclos seguintes, o que resulta numa limitação de 22,1%. Esta e todas as percentagens que se seguem relativas à limitação dizem respeito à redução da corrente de linha face à corrente presumida. O cálculo é feito ignorando o primeiro pico que, apesar de subtil, é ligeiramente superior aos restantes ciclos, pelo que a percentagem calculada seria ligeiramente menor se fosse considerado o valor máximo da corrente de linha no primeiro ciclo de limitação. A pequena diferença entre as duas correntes antes da falha deve-se ao facto de se ter desprezado a resistência dos enrolamentos no cálculo da corrente presumida.

Por último, apresenta-se o comportamento dinâmico do LCS como sendo a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.11).

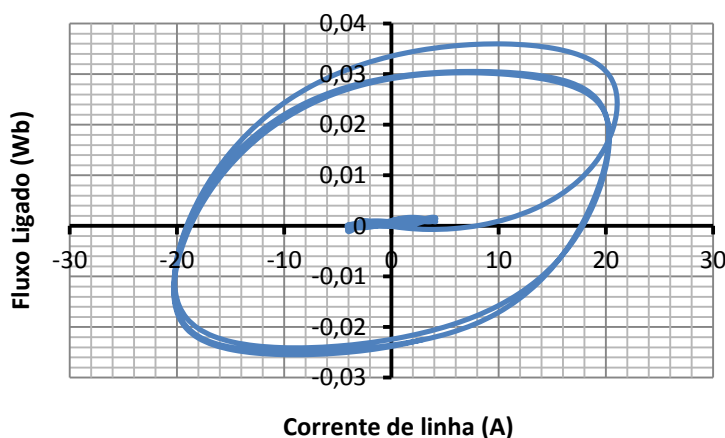


Figura 5.11 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 25,8 \text{ A}$ com núcleo fechado.

A Figura 5.11 mostra claramente a transição entre a situação de funcionamento normal e de falha. Durante o funcionamento normal, praticamente não há fluxo no ferro, já que este está a ser blindado pelo SAT, e portanto a característica ronda a zona correspondente a fluxo ligado nulo e corrente de linha sinusoidal abaixo dos 5 A de amplitude. Dada a falha, a corrente aumenta abruptamente até que o fluxo penetra no ferro, fazendo aumentar o fluxo ligado, dando-se a limitação da corrente. O limitador fica então a descrever um ciclo de histerese, em que as laterais indicam o valor em que a corrente é limitada, i.e., próximo dos 20 A. Estes valores são confirmados pelos andamentos temporais da Figura 5.10, sendo aqui também possível distinguir o primeiro pico de limitação, próximo dos 21 A. Nesta fase, a corrente não é suficiente para se distinguir o efeito da saturação do ferro no ciclo de histerese traçado, o que se enquadra no cenário ideal, já que o limitador não deve atingir a saturação para não perder as suas capacidades limitadoras de corrente. O mesmo já não acontece para casos em que a corrente seja mais elevada, como se verá adiante.

Seguem-se agora os mesmos resultados para o caso intermédio de corrente presumida, onde para uma $u_{alim} = 39,9 V_{ef}$, a corrente de linha em condição normal é de $i_{linha} = 3,2 A_{ef}$, resultando numa impedância equivalente de $Z_{eq} = 12,5 \Omega$, da qual $1,1 \Omega$ é resistência de amostragem e os mesmos 9Ω são de impedância Z_{rede} . A corrente máxima de curto-circuito presumida é $i_{pres} = 51,3 A$.

Existe uma queda de tensão máxima em funcionamento normal de $5,25 V$ aos terminais do LCS em condição normal de funcionamento, cerca de $9,3\%$ da tensão de alimentação, o que é representativo de perdas. Tendo em conta que as condições são próximas das anteriores, este valor deveria ser também reduzido, o que leva a crer que pode ter havido um problema de instrumentação na aquisição dos dados. Dado a corrente solicitada durante a falha ser maior que no caso anterior, o efeito da não idealidade das fontes, neste caso dos transformadores, torna-se mais visível. A Figura 5.12 apresenta o andamento temporal da corrente de linha i_{linha} acompanhado da corrente presumida i_{pres} . Da sua análise verifica-se que uma corrente presumida máxima de $51,3 A$ foi limitada para $36,6 A$ no primeiro pico e para $34,27 A$ nos ciclos subsequentes, o que resulta numa limitação de $33,2\%$. A limitação mostra-se ser superior à do caso anterior, sendo também visível uma corrente de linha no primeiro pico superior ao valor nos ciclos subsequentes.

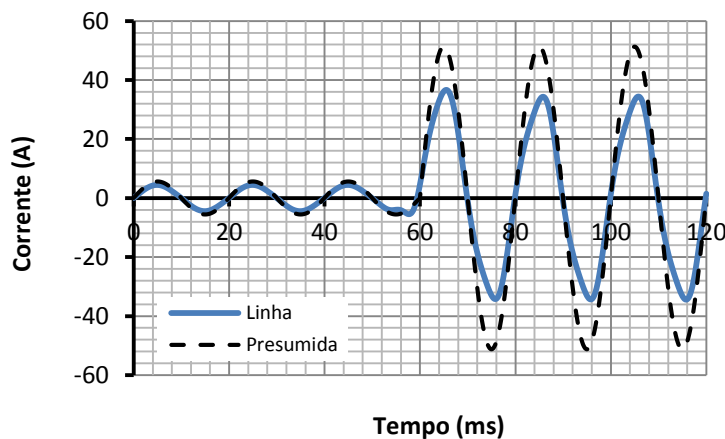


Figura 5.12 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 ms$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 51,3 A$ com núcleo fechado.

Por último apresenta-se o comportamento dinâmico do LCS como a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.13), para este caso intermédio. Uma vez mais, é evidente a zona pré falha, correspondente a fluxo ligado nulo e corrente de linha sinusoidal abaixo dos $5 A$ de amplitude. Na situação pós falha, é descrito o ciclo de histerese onde ocorre a limitação, à semelhança do caso anterior.

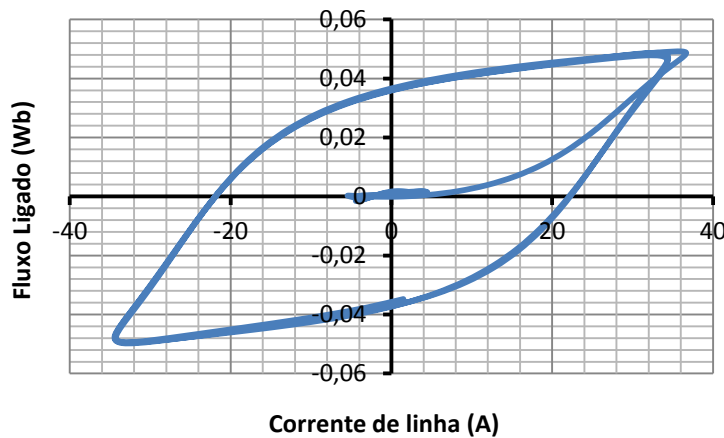


Figura 5.13 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 51,3 A$ com núcleo fechado.

Aqui já é visível algum efeito da saturação do núcleo de ferro, em que o valor do fluxo ligado tende a estagnar, não acompanhando o aumento da corrente. Em conformidade com o andamento temporal da Figura 5.12, a limitação é aqui mais eficaz, já que existe mais fluxo a circular no ferro. No entanto, uma vez que já começa a fazer-se sentir a saturação do núcleo de ferro, um aumento da corrente de linha não seria acompanhado por um aumento considerável no fluxo ligado, pelo que a primeira não seria limitada tão eficazmente como para uma situação imediatamente antes da saturação. A diferença entre a corrente do primeiro pico e a dos ciclos seguintes é visível no canto superior direito na figura.

Por fim, apresentam-se os resultados para o caso de maior corrente presumida, uma tensão de alimentação $u_{alim} = 40,2 V_{ef}$, uma corrente de linha em condição normal de $i_{linha} = 3,35 A_{ef}$, o que resulta numa impedância equivalente de $Z_{eq} = 12 \Omega$, da qual $0,55 \Omega$ é resistência de amostragem e 9Ω de impedância Z_{rede} . A corrente máxima de curto-circuito presumida é $i_{pres} = 103,4 A$.

A queda de tensão no LCS em regime de funcionamento normal é mínima para este caso, representando o cenário idealmente esperado, em que uma queda de tensão máxima de $0,25 V$ aos terminais do LCS representa apenas $0,45\%$ da tensão de alimentação, levando a perdas praticamente desprezáveis, i.e, o dispositivo é praticamente transparente na linha em condições normais. Por outro lado, este é o caso mais flagrante da não idealidade dos equipamentos, visto que a tensão de alimentação sofre uma queda considerável quando o curto-circuito surge na linha solicitando correntes elevadas. Por fim, a forma da tensão no LCS também deixa de ser puramente sinusoidal, facto que irá ser justificado pela análise dos resultados que se seguem.

A Figura 5.14 apresenta o andamento temporal da corrente de linha i_{linha} acompanhado da corrente presumida i_{pres} .

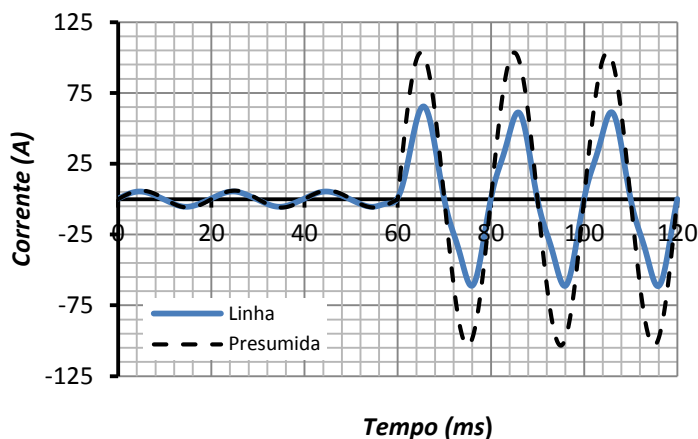
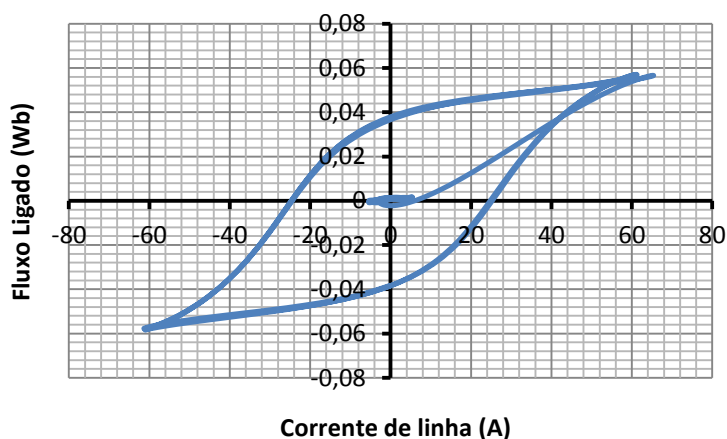


Figura 5.14 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 \text{ ms}$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 103,4 \text{ A}$ com núcleo fechado.

Da sua análise verifica-se uma corrente presumida máxima de $103,4 \text{ A}$, limitada para $65,4 \text{ A}$ no primeiro pico e para $60,9 \text{ A}$ nos ciclos seguintes, o que resulta numa limitação de $41,1\%$. A limitação é a melhor dos três casos para este tipo de núcleo. A corrente de linha também não é sinusoidal, devido à saturação intensa do núcleo de ferro, como terá oportunidade de se ver através do comportamento dinâmico do LCS, i.e., pela excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.15). Mais uma vez, é distinguível a existência do primeiro pico na limitação, superior aos demais.

Figura 5.15 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 103,4 \text{ A}$ com núcleo fechado.



É possível identificar a transição de fluxo nulo no ferro para a zona de limitação delimitada pelo ciclo de histerese formado durante a existência do curto-circuito. Os valores de corrente, tanto antes como depois da limitação, estão coerentes com o andamento temporal mostrado na Figura 5.14. O efeito de saturação do núcleo de ferro é evidente aqui, o

que justifica as formas não sinusoidais da tensão do LCS e da corrente de linha. O facto de existir saturação obriga a que a corrente e o fluxo não possam ser simultaneamente sinusoidais, dada a não linearidade da característica magnética do núcleo. Uma vez mais, por ser maior a corrente presumida, também a limitação é comparativamente superior aos casos anteriores. Contudo, esta seria maior se para esta corrente, o núcleo atingisse o ponto imediatamente antes da saturação.

5.4.2 Núcleo Aberto

Apresentam-se agora os resultados obtidos no ensaios do LCS usando os núcleos abertos. Uma vez que atingir a saturação magnética num núcleo aberto é muito mais difícil do que num núcleo fechado, tal não foi possível em ambiente experimental. Por esta razão, o problema da perda da capacidade limitadora pelo facto de se saturarem os núcleos não se põe em qualquer destes ensaios. Assim, os diferentes ensaios não variam muito entre si no que diz respeito ao seu aspecto visual e às conclusões retiradas, variando apenas nos valores de corrente, fluxo ligado, tensões e limitações associadas. Assim, seria repetitivo apresentar todos os resultados para todas as variantes, i.e., resultados de três núcleos abertos diferentes sujeitos a três correntes presumidas diferentes, e portanto optou-se por apresentar resultados correspondentes apenas a uma corrente presumida para cada núcleo aberto.

5.4.2.1 Comprimento Menor

Sob as mesmas condições, apresentam-se os resultados correspondentes ao caso de maior corrente presumida. Assim, de uma alimentação de $u_{alim} = 40,1 V_{ef}$ e corrente de linha em condição normal de $i_{linha} = 3,39 A_{ef}$, resulta uma impedância equivalente de $Z_{eq} = 11,82 \Omega$, da qual $0,55 \Omega$ é resistência de amostragem e 9Ω a impedância Z_{rede} . A corrente de curto-circuito máxima presumida é de $i_{pres} = 103,1 A$. O curto-circuito dá-se para $t = 60 ms$.

Uma queda de tensão máxima de $0,14 V$ aos terminais do LCS em condição normal de funcionamento representa cerca de $0,25\%$ da tensão de alimentação, revelando perdas desprezáveis de acordo com o desejável. A corrente de linha tem o andamento temporal da Figura 5.16 onde a tracejado se representa a corrente presumida. A corrente presumida máxima de $103,1 A$ é limitada para $68,8 A$, correspondendo a uma limitação de $33,2\%$.

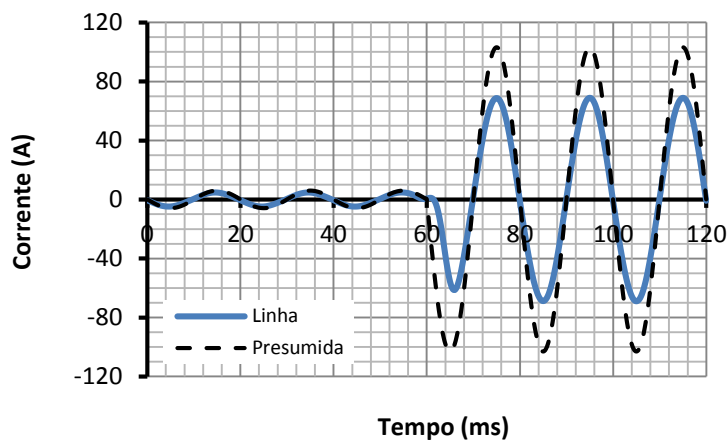
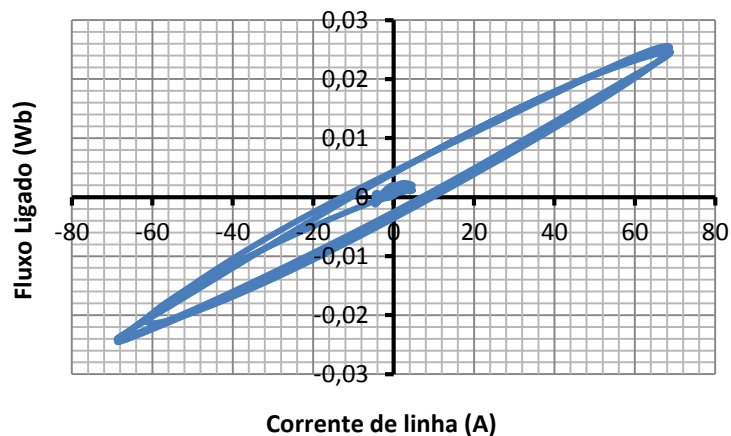


Figura 5.16 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 \text{ ms}$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 103,1 \text{ A}$ com núcleo aberto menor.

Por último apresenta-se o comportamento dinâmico do LCS como a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.17).

Figura 5.17 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 103,1 \text{ A}$ com núcleo aberto menor.



É evidente a zona anterior à falha, onde a excursão se mantém perto da origem do referencial, evidenciando blindagem do fluxo, mantendo-se a corrente de linha sinusoidal abaixo dos 5 A de amplitude. Na situação após falha, é descrito um ciclo de histerese à semelhança do que acontecia no caso do LCS com núcleo fechado, sendo que a saturação do ferro não é visível neste caso. O ciclo descrito é coerente com o andamento temporal da Figura 5.16.

Os outros dois casos ensaiados em laboratório com o LCS de núcleo aberto menor, sendo de menor corrente presumida, obviamente também não evidenciam qualquer vestígio de saturação magnética do núcleo, não acrescentando nada de novo ao que já foi apresentado. Por outro lado, à semelhança do que aconteceu com o núcleo fechado, a limitação conseguida é menor para os casos de menor corrente presumida, já que menores quantidades de fluxo penetram o núcleo.

5.4.2.2 Comprimento Médio

Pelas mesmas razões de antes, apresenta-se apenas o melhor caso de limitação para o LCS usando o núcleo aberto de comprimento médio. À semelhança dos anteriores, a tensão de alimentação é de $u_{alim} = 40 V_{ef}$, a corrente de linha em condição normal é de $i_{linha} = 3,37 A_{ef}$, o que resulta numa impedância equivalente de $Z_{eq} = 11,87 \Omega$, da qual $0,55 \Omega$ é resistência de amostragem e 9Ω a impedância Z_{rede} . A corrente de curto-circuito máxima presumida é de $i_{pres} = 102,9 A$. O curto-circuito dá-se para $t = 60 ms$.

Para além do sempre presente efeito da não idealidade dos transformadores, verifica-se que existem algumas perdas introduzidas pelo LCS em regime normal de funcionamento, as quais não podem ser consideradas desprezáveis. Existe uma queda de tensão máxima no LCS de $5,87 V$ em condição normal de funcionamento, o que representa $10,4\%$ da tensão de alimentação. Esta percentagem, por se revelar tão elevada, leva a concluir que ocorreu um problema na instrumentação ou na aquisição dos dados, já que noutras circunstâncias o limitador apresentou quedas de tensão desprezáveis aos seus terminais, durante o funcionamento normal.

Segue-se o andamento temporal das correntes de linha e presumida (Figura 5.18), onde a corrente máxima presumida de $102,9 A$ é limitada para $64,51 A$, atingindo-se assim uma limitação na ordem dos $37,2\%$.

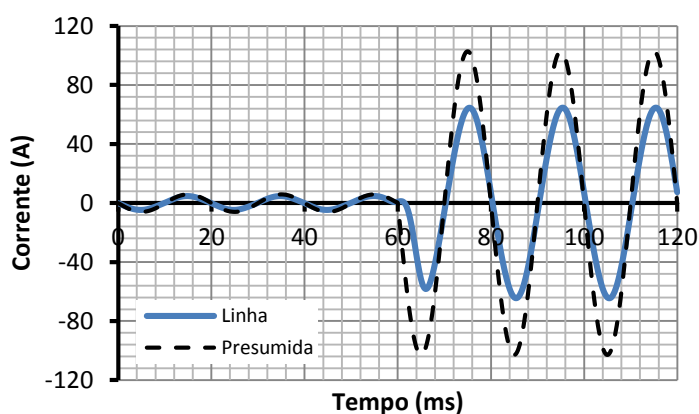


Figura 5.18 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 ms$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 102,9 A$ com núcleo aberto médio.

Por fim, apresenta-se o comportamento dinâmico do LCS como a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.19), para este caso em concreto.

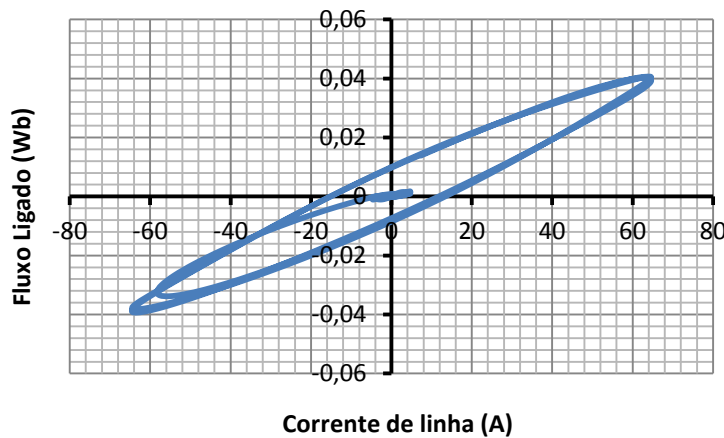


Figura 5.19 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 102,9 A$ com núcleo aberto médio.

As conclusões a retirar são essencialmente as mesmas para o ensaio equivalente no LCS com núcleo aberto menor. Comparativamente, a forma do ciclo é essencialmente a mesma, mudando apenas ligeiramente os valores das grandezas associadas. Por outro lado, verifica-se aqui uma maior limitação do que no caso do núcleo menor, explicada pela menor relutância magnética, o que leva a um maior fluxo, quer simples quer ligado. Assim, espera-se que o caso seguinte do LCS com núcleo aberto maior apresente a mais alta limitação de entre todos os núcleos abertos.

5.4.2.3 Comprimento Maior

Seguindo a mesma abordagem, apresenta-se o melhor caso de limitação para o LCS com núcleo aberto de comprimento maior. A tensão de alimentação é de $u_{alim} = 40 V_{ef}$, a corrente de linha em condição normal é de $i_{linha} = 3,37 A_{ef}$, o que resulta numa impedância equivalente de $Z_{eq} = 11,87 \Omega$, da qual $0,55 \Omega$ é resistência de amostragem e 9Ω a impedância Z_{rede} . A corrente de curto-circuito máxima presumida é de $i_{pres} = 102,9 A$. O curto-circuito dá-se para $t = 60 ms$. Neste caso, a queda de tensão no limitador em regime normal é praticamente desprezáveis, representando apenas $0,51 V$, i.e., $0,89\%$ da tensão de alimentação.

Na Figura 5.20 mostra-se o andamento temporal das correntes de linha e presumida, onde a corrente máxima presumida de $102,9 A$ é limitada para $61,84 A$, atingindo-se assim uma limitação na ordem dos $39,9\%$.

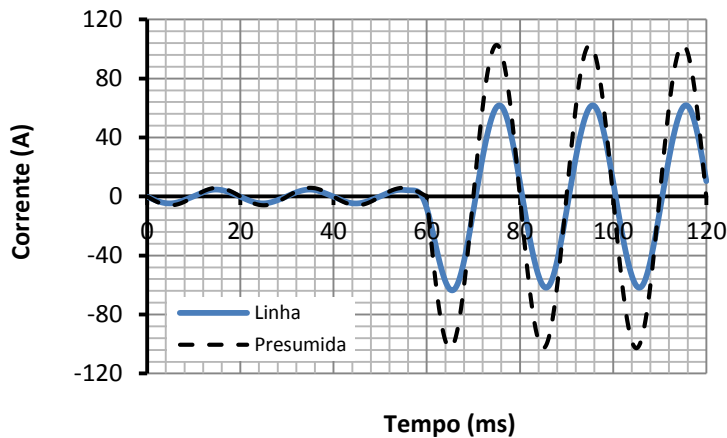
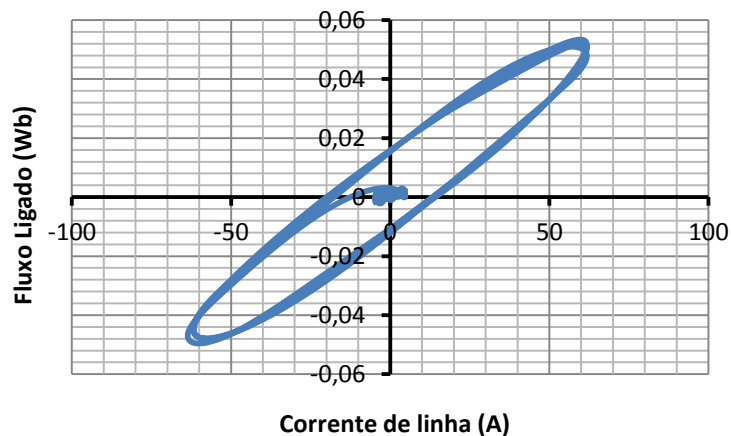


Figura 5.20 – Andamento temporal da corrente de linha após um curto-circuito aplicado em $t = 60 \text{ ms}$. A corrente presumida também é mostrada. Caso de $i_{pres} = 102,9 \text{ A}$ com núcleo aberto maior.

Finalmente, apresenta-se o comportamento dinâmico do LCS como a excursão do fluxo ligado do limitador no plano $i\psi$ (Figura 5.21).

Figura 5.21 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha. Caso de $i_{pres} = 102,9 \text{ A}$ com núcleo aberto maior.



Pelo ciclo descrito confirmam-se as já conhecidas características de funcionamento do LCS nos seus regimes de funcionamento normal e em falha. Adicionalmente, em conjunto com os andamentos da Figura 5.20, confirma-se também a previsão de que esta seria a topologia com resultados de maior limitação de entre os limitadores com núcleo aberto.

5.5 Conclusões

Este capítulo foi inteiramente dedicado ao comportamento dinâmico dos vários LCSs ensaiados, i.e., com núcleo fechado e três núcleos abertos de diferentes comprimentos. Começou-se por apresentar o que seria a base de comparação para os resultados experimentais, i.e., as simulações efectuadas em *Flux2D*, obtidas em (Pina, 2010). Seguidamente apresentou-se a metodologia adoptada para a realização dos ensaios

experimentais em laboratório, bem como a explicação da implementação do aparato experimental necessário para o efeito. Só depois se apresentam os resultados obtidos para os quatro limitadores ensaiados, analisando-se essencialmente três conjuntos de dados para cada um:

- 1) O andamento temporal das tensões de alimentação e aos terminais do LCS, a fim de se inferir acerca da queda de tensão no limitador, sinónimo de perdas introduzidas em regime normal de operação.
- 2) O andamento temporal da corrente de linha e da corrente presumida, com o objectivo de avaliar o desempenho do dispositivo em termos de limitação efectiva da corrente.
- 3) A excursão no plano $i\psi$ por forma a avaliar o comportamento dinâmico do limitador, antes e durante uma falha.

Concluiu-se que o núcleo fechado é o único que apresenta saturação no ferro e cuja forma do ciclo de histerese se diferencia dos restantes. Nos casos em que se verifica saturação, o LCS apresentaria melhor desempenho se o seu núcleo tivesse sido dimensionado para ficar num estado imediatamente antes da saturação durante a limitação da corrente.

O LCS de núcleo aberto maior é o que apresenta a maior limitação de entre os três da sua categoria. As perdas introduzidas pelo limitador em regime normal são um factor importante e são, na maioria dos casos apresentados, consideradas desprezáveis, levando a concluir que ocorreram problemas na aquisição de dados em situações em que tal não se verifica.

Por fim, interessa dizer que os resultados experimentais obtidos relevam-se, na sua forma, idênticos aos de simulação apresentados na Figura 5.1, apesar das diferentes condições de ensaio. No entanto, no próximo capítulo serão feitas análises comparativas com os dados aqui apresentados, a fim de discutir e comparar os diferentes limitadores e respectivos desempenhos, bem como validar o método de modelização proposto na secção 4.3.

6 Comparação e Discussão de Resultados

6.1 Introdução

Obtidos os resultados acerca do comportamento dinâmico do LCS, e já que isto foi feito para diferentes núcleos e para diferentes correntes presumidas, interessa fazer análises comparativas destes resultados a diferentes níveis, não só a fim de perceber as principais diferenças no desempenho mas principalmente com o objectivo de validar a metodologia para modelização dos LCS através da sua característica magnética. Assim, neste capítulo, recorre-se aos ensaios experimentais abordados no capítulo anterior, incluindo os não apresentados, para fazer análises comparativas acerca do desempenho dos vários limitadores desenvolvidos. Estes serão revisitados primeiramente com o objectivo de validar a metodologia proposta para modelização deste tipo de limitadores, onde os resultados serão discutidos individualmente para cada topologia de núcleo utilizada, i.e., para o núcleo fechado e os três abertos de diferentes comprimentos. Seguidamente, serão feitas análises comparativas entre as diferentes topologias, entenda-se diferentes núcleos no limitador por blindagem magnética, passando depois por uma avaliação do funcionamento do limitador para diferentes instantes no tempo. Por último são tecidas algumas conclusões gerais sobre os tópicos abordados no capítulo.

6.2 Validação dos Modelos baseados na Característica Magnética do LCS

Pretende-se usar os resultados experimentais obtidos, nomeadamente os que dizem respeito à excursão no plano iy do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, para validação dos modelos obtidos através da metodologia proposta em 4.3, baseada na

característica magnética do LCS. Isso será feito individualmente para cada topologia de núcleo usada, comparando-se os resultados experimentais com o que é sugerido pelo referido modelo.

Assim, para cada topologia, o modelo é validado se os resultados experimentais se mostrarem em conformidade com os respectivos ciclos de histerese máximos apresentados na Figura 4.20, o que implica que a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS se apresente paralela ao seu ciclo de histerese máximo. Para o efeito, para cada topologia apresentam-se os dados experimentais respectivos à excursão no plano $i\psi$, comparando-os com os resultados de simulação e com os parâmetros do modelo obtidos experimentalmente.

6.2.1 LCS com Núcleo Fechado

Apresenta-se na Figura 6.1 uma sobreposição da excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, ψ_{LCS} , para os três casos de diferentes correntes presumidas no ensaio do LCS de núcleo fechado,. No mesmo plano, para efeitos de comparação gráfica, apresenta-se ainda o ajuste polinomial da característica magnética do núcleo fechado (dados experimentais), ψ_0 , a qual foi obtida e apresentada na secção 4.4.2.2, Figura 4.15.

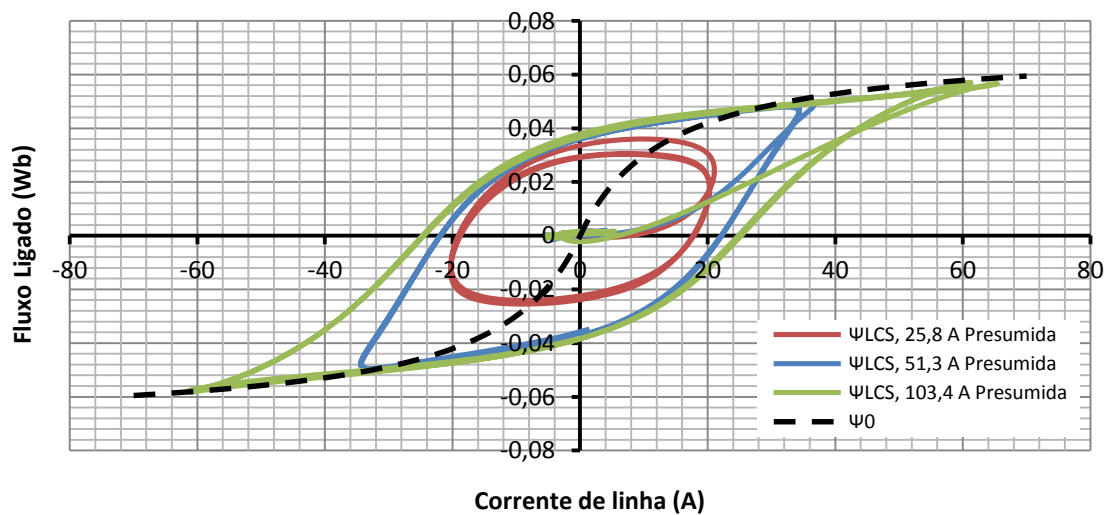


Figura 6.1 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, ψ_{LCS} , e característica magnética do núcleo fechado, ψ_0 , para diferentes correntes presumidas.

Os modelos e simulações prévias levavam a crer que a excursão no plano $i\psi$ seria sempre limitada pelo ciclo de histerese máximo do LCS, atravessando o eixo da corrente de

linha sempre no mesmo ponto, independentemente do nível de curto-circuito, i.e., da corrente presumida, como revela a Figura 5.1a, a qual é limitada pelo ciclo de histerese máximo da Figura 4.20a. Contudo, os resultados experimentais mostram que este ponto no eixo da corrente depende directamente da corrente de curto-circuito presumida, já que quanto maior é esta última, mais elevada é a corrente de linha no ponto de cruzamento do seu eixo.

Apesar desta discrepância relativamente aos resultados de simulação, os resultados estão coerentes com a característica experimental do SAT apresentada na secção 4.4.1.2, Figura 4.6, onde se pode ver a dependência das correntes induzidas no SAT com a força magnetomotriz, i.e., indirectamente com a corrente de linha. Por outro lado, a excursão do limitador no plano $i\psi$ revela ser paralela à característica magnética do núcleo utilizado, o que permite concluir que existe um ciclo máximo de histerese aproximado, baseado nas características experimentais do SAT e do núcleo de ferro, que inclui a excursão do limitador. Posto isto, tanto os resultados experimentais da excursão do LCS como os da característica do SAT mostram que a limitação da corrente não ocorre independentemente num valor fixo dado por $I_{SAT}^*/N_1 = 560/58 = 9,7 \text{ A}$, ao contrário do que se previa nos modelos teóricos.

Outro aspecto interessante é o facto de, a partir do momento em que se atinge a saturação do núcleo, os valores de fluxo ligado sobrepõem-se, independentemente do nível de corrente presumida. Este efeito é visível para as características desenhadas a verde e a azul, onde as zonas de fluxo ligado elevado, em redor do cruzamento com o eixo vertical, estão completamente sobrepostas. Esta zona corresponde aproximadamente a um fluxo ligado de $\psi = 0,035 \text{ Wb}$, o que tendo em conta as 58 espiras do primário e a secção do núcleo de 400 mm^2 , fazendo o cálculo para o campo de indução magnética resulta aproximadamente em $B = 1,51 \text{ T}$, valor típico de saturação no ferro.

6.2.2 LCS com Núcleo Aberto Menor

À imagem do que foi feito para o LCS de núcleo fechado, apresentam-se agora os resultados experimentais correspondentes ao LCS de núcleo aberto menor, a fim de retirar o mesmo tipo de conclusões. A excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico deste LCS durante uma falha é apresentada na Figura 6.2 para os três diferentes níveis de corrente presumida.

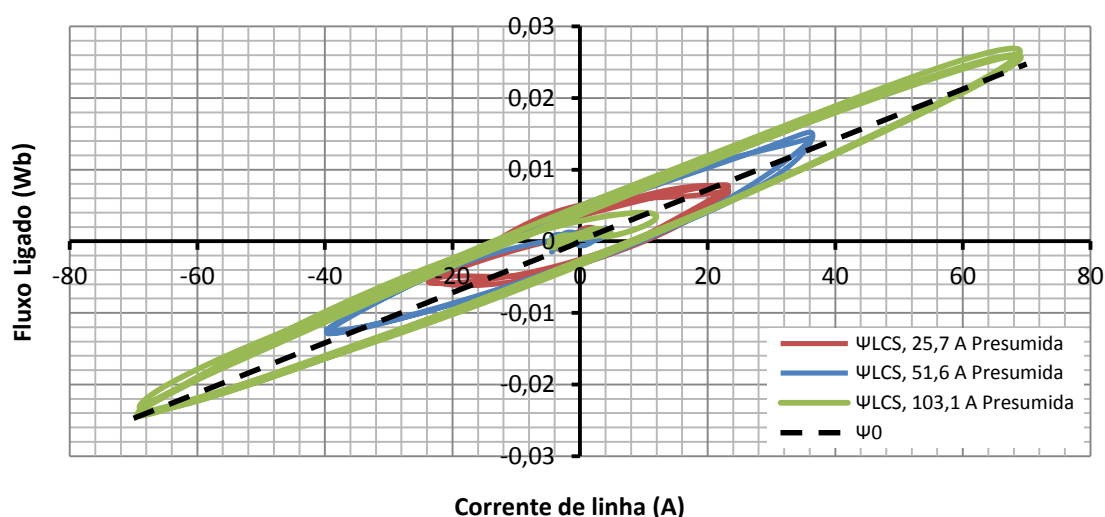


Figura 6.2 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, ψ_{LCS} , e característica magnética do núcleo aberto menor, ψ_0 , para diferentes correntes presumidas.

Apesar do aspecto bastante diferente, já que se trata de um núcleo aberto, as conclusões são essencialmente as mesmas que anteriormente. Neste caso, os resultados experimentais e os de simulação (excursão da Figura 5.1b baseada no ciclo de histerese máximo da Figura 4.20b) são mais semelhantes, uma vez que o ponto de cruzamento das características com o eixo da corrente de linha é o mesmo. Isto justifica-se pelo facto de neste núcleo não se conseguir atingir a saturação magnética, pelo que não se sai da zona linear e portanto o fluxo ligado depende apenas da corrente de linha, sendo o mesmo nos três casos para iguais valores de corrente de linha.

Contudo, o ciclo não se vê limitado por um valor máximo, já que quanto maior a corrente presumida, também maior é a corrente de linha atingida. Os resultados mostram-se então coerentes com as características experimentais do SAT (Figura 4.6) e do núcleo aberto menor (Figura 4.16), já que a excursão do LCS para os três casos apresenta-se aproximadamente paralela à característica magnética do núcleo. Tal situação remete para a existência de um ciclo máximo de histerese aproximado que inclui a excursão do limitador.

6.2.3 LCS com Núcleo Aberto Médio

Da mesma forma, apresenta-se na Figura 6.3 a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico deste LCS durante uma falha, para os três diferentes níveis de corrente presumida ensaiados.

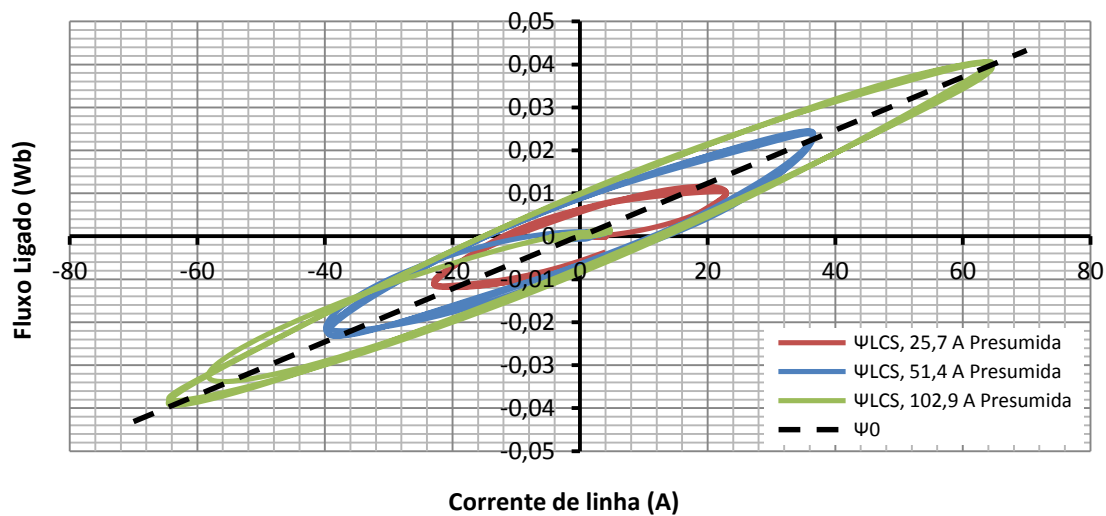


Figura 6.3 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, ψ_{LCS} , e característica magnética do núcleo aberto médio, ψ_0 , para diferentes correntes presumidas.

Este caso é idêntico ao caso anterior, com a mesma forma na excursão, com os mesmos níveis de corrente presumida, variando apenas nos valores do fluxo ligado, i.e. na inclinação da característica. Assim, são notórias as semelhanças com os resultados de simulação (excursão da Figura 5.1c baseada no ciclo de histerese máximo da Figura 4.20c). Por ser mais comprido que o anterior, a relutância magnética do núcleo é menor, o que leva a um maior fluxo magnético no ferro para a mesma corrente de linha, levando a uma maior inclinação no plano $i\psi$ deste limitador.

Os resultados mostram-se então coerentes com as características experimentais do SAT (Figura 4.6) e do núcleo aberto de comprimento médio (Figura 4.17), já que a excursão do LCS se mantém sempre aproximadamente paralela à característica magnética do núcleo. Da mesma forma que se havia concluído acerca das diferenças nas inclinações das características do núcleos, por lhe serem paralelas, também as excursões no plano $i\psi$ vão apresentar essas mesmas diferenças entre si, como se irá confirmar de seguida com o núcleo de maior comprimento. Tal situação remete para a existência de um ciclo máximo de histerese aproximado que inclui a excursão do limitador.

6.2.4 LCS com Núcleo Aberto Maior

Por fim, já prevendo o que se irá obter, apresenta-se a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS de núcleo aberto maior durante uma falha, para os três níveis de corrente presumida.

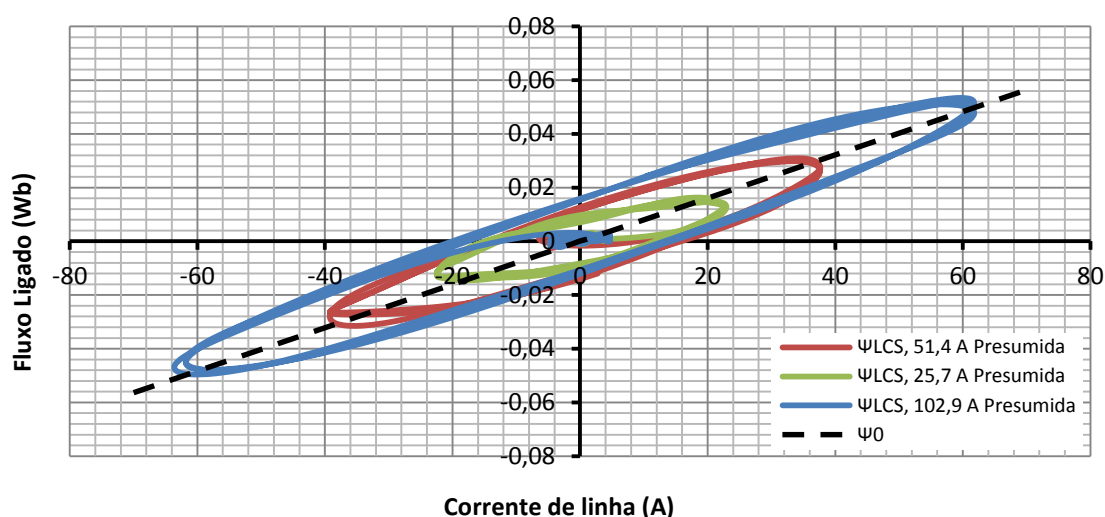


Figura 6.4 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha, ψ_{LCS} , e característica magnética do núcleo aberto maior, ψ_0 , para diferentes correntes presumidas.

À semelhança do que concluiu anteriormente, e indo ao encontro ao que era esperado, detectam-se apenas variações nos valores do fluxo. Continuam visíveis as semelhanças com os resultados de simulação (excursão da Figura 5.1d baseada no ciclo de histerese máximo da Figura 4.20d). As variações no valor do fluxo devido à diminuição da relutância magnética deste núcleo de maior comprimento levam à mais inclinada excursão no plano $i\psi$ de entre todos os LCS de núcleo aberto. Os resultados mantêm-se coerentes com as características experimentais do SAT (Figura 4.6) e magnética do núcleo aberto de comprimento maior (Figura 4.18), mantendo-se a excursão no plano $i\psi$ sempre aproximadamente paralela à característica magnética do núcleo, ψ_0 . Tal situação remete para a existência de um ciclo máximo de histerese aproximado que inclui a excursão do limitador.

6.2.5 Conclusões

Das análises feitas aos resultados experimentais apresentados nesta secção, há a reter que, durante o curto-circuito, a corrente da linha depende directamente da corrente presumida, i.e., a limitação da corrente não ocorre independentemente num valor fixo dado por I_{SAT}^*/N_1 , ao contrário do que se previa nos modelos teóricos. Estas diferenças têm por base essencialmente as discrepâncias entre a característica teórica (Figura 4.3) e a característica experimental obtida (Figura 4.6) do SAT. Enquanto a primeira variava entre dois valores extremos correspondentes à máxima corrente de blindagem do SAT, a segunda mostra que a corrente do SAT varia num ciclo de histerese que depende da força magnetomotriz do primário. Por outro lado, a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS

apresenta-se sempre paralela à característica magnética do núcleo de ferro utilizado, seja ele qual for.

Assim, numa perspectiva de validação dos modelos apresentados na secção 4.3, é importante referir que esta não foi totalmente conseguida, já que estes apresentam algumas falhas, nomeadamente na característica do SAT, que se mostra fundamental na aplicação da metodologia. Contudo, simulações feitas no âmbito desta dissertação e apresentadas na secção 4.4.1.3 provaram que é possível adaptar as simulações efectuadas de modo a convergir os seus resultados com os obtidos experimentalmente. Essas adaptações consistem essencialmente na adopção de diferentes modelos do comportamento do SAT, que considerem a dependência existente entre a densidade de corrente e a densidade de fluxo magnético, podendo levar à modelização matemática do elemento SAT a partir dos resultados experimentais obtidos por medição. Com isso estaria completa a validação do método de modelização proposto.

No entanto, os resultados experimentais seguem o conceito da metodologia proposta, uma vez que estão coerentes com a característica experimental do SAT (Figura 4.6) e com a respectiva característica magnética do núcleo utilizado. Conclui-se então que algumas considerações prévias do modelo são válidas e aplicáveis, já que a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmica do LCS é efectivamente limitada por um ciclo de histerese máximo determinado pela característica magnética do núcleo de ferro utilizado.

6.3 Comparações entre os diferentes LCSs

Comparam-se agora os desempenhos dos diferentes limitadores entre si, a fim de avaliar qual das topologias do núcleo se mostra mais eficaz. Assim, para cada um dos três níveis de corrente presumida em que foram efectuados ensaios, sobrepõem-se as excursões no plano $i\psi$ do comportamento dinâmica dos quatro LCSs, i.e., do de núcleo fechado e dos três de núcleo aberto.

6.3.1 Corrente presumida de 25,8 A

Começa-se então por apresentar na Figura 6.5, o caso de corrente presumida menor, na ordem dos 25,8 A.

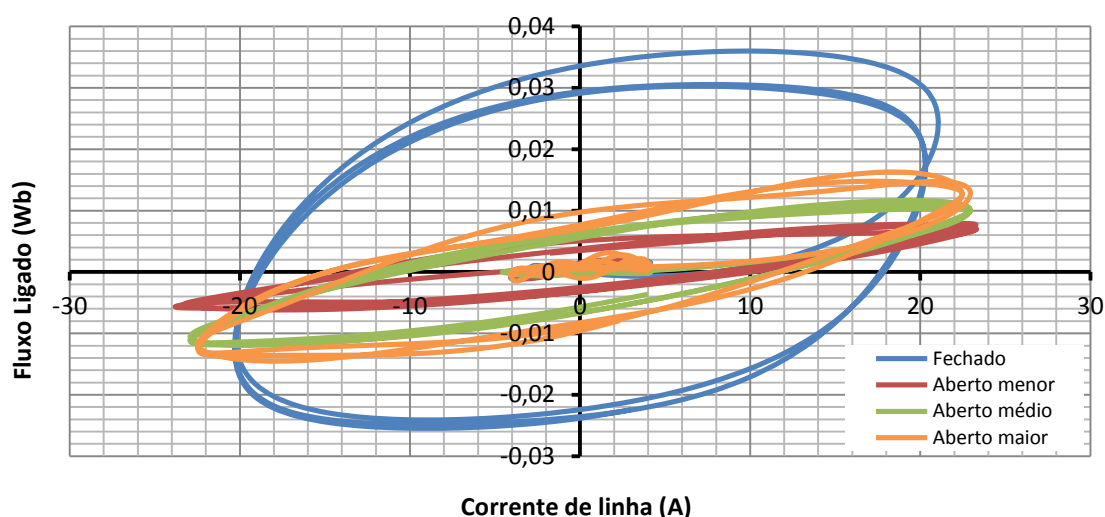


Figura 6.5 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico dos diferentes LCSs durante uma falha, ψ_{LCS} , para uma corrente presumida na ordem dos 25,8 A.

Neste caso, como a corrente de linha é baixa, o fluxo ligado não é suficiente para atingir a saturação, nem mesmo no núcleo fechado, o que é algo positivo. É possível reparar em alguns aspectos já comentados anteriormente, nomeadamente as diferentes inclinações nas características dos limitadores de núcleo aberto, e o maior fluxo conseguido no de núcleo fechado dada a diminuição progressiva das relutâncias magnéticas do núcleo aberto menor para o fechado. Isso traduz-se, como era esperado, numa melhor limitação do LCS de núcleo fechado, seguida do de núcleo aberto maior, sendo o de comprimento menor o menos eficaz. A Tabela 6.1 resume as características dos limitadores para este caso, sendo a percentagem da limitação correspondente à redução da corrente de linha face à presumida e a percentagem da queda de tensão no LCS calculada face à tensão de alimentação em situação de funcionamento normal. A percentagem de limitação considera a máxima corrente de linha sentida após o primeiro pico, apesar da sua diferença para os ciclos subsequentes ser mínima.

Tabela 6.1 – Comparação do desempenho dos diferentes LCS para uma corrente presumida na ordem dos 25,8 A.

	<i>Limitação (%)</i>	<i>Queda de tensão no LCS (%)</i>
Núcleo aberto menor	9,4 %	0,38 %
Núcleo aberto médio	10 %	6,9 %
Núcleo aberto maior	10 %	0,21 %
Núcleo Fechado	22,1 %	3,77 %

Tal com já referido anteriormente, calcula-se que tenham havido erros de instrumentação na leitura e aquisição dos dados relativamente à queda de tensão no LCS para o núcleo aberto médio, dada a sua elevada percentagem. Todos os outros resultados mostram-se concordantes com o que era esperado.

6.3.2 Corrente presumida de 51,4 A

O mesmo tipo de comparação é feita, agora para o caso de uma corrente presumida na ordem dos 51,4 A (Figura 6.6).

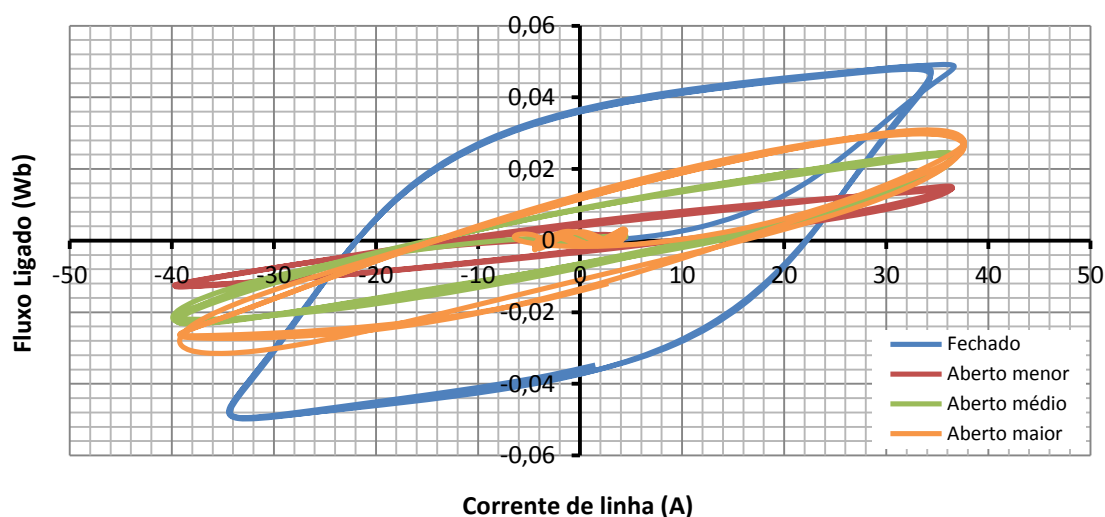


Figura 6.6 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico dos diferentes LCSs durante uma falha, ψ_{LCS} , para uma corrente presumida na ordem dos 51,4 A.

Para além das conclusões óbvias já referidas noutros casos, confirma-se que a limitação no LCS de núcleo fechado é a mais eficaz, ignorando o primeiro pico. Esta eficácia poderia ser ainda mais evidente se o núcleo fosse dimensionado por forma a não atingir a saturação no momento da limitação. Os resultados comparativos dos LCSs de núcleos abertos não são neste caso concordantes com o esperado, pelo que algo correu mal ao nível da instrumentação e aquisição de dados. Tal como aconteceu no caso anterior, e irá acontecer no próximo, o LCS de núcleo aberto menor é o menos eficaz na limitação, seguido do médio e depois o maior, o que não se verifica neste caso. A Tabela 6.2 resume as características evidenciadas nesta comparação.

Tabela 6.2 – Comparação do desempenho dos diferentes LCS para uma corrente presumida na ordem dos 51,4 A.

	<i>Limitação (%)</i>	<i>Queda de tensão no LCS (%)</i>
Núcleo aberto menor	29,3 %	0,26 %
Núcleo aberto médio	28,5 %	8,7 %
Núcleo aberto maior	26,7 %	1,44 %
Núcleo Fechado	33,2 %	9,26 %

Confirma-se então a incoerência nas percentagens de limitação nos núcleos abertos, bem como as elevadas quedas de tensão no caso do núcleo aberto médio e núcleo fechado. Como referido, pensa-se que erros de instrumentação tenham afectado a aquisição dos dados, justificando assim estes resultados.

6.3.3 Corrente presumida de 102,9 A

Por último, compara-se o desempenho dos limitadores para uma corrente presumida na ordem dos 102,9 A, através das excursões no plano $i\psi$ dos seus comportamentos dinâmicos (Figura 6.7).

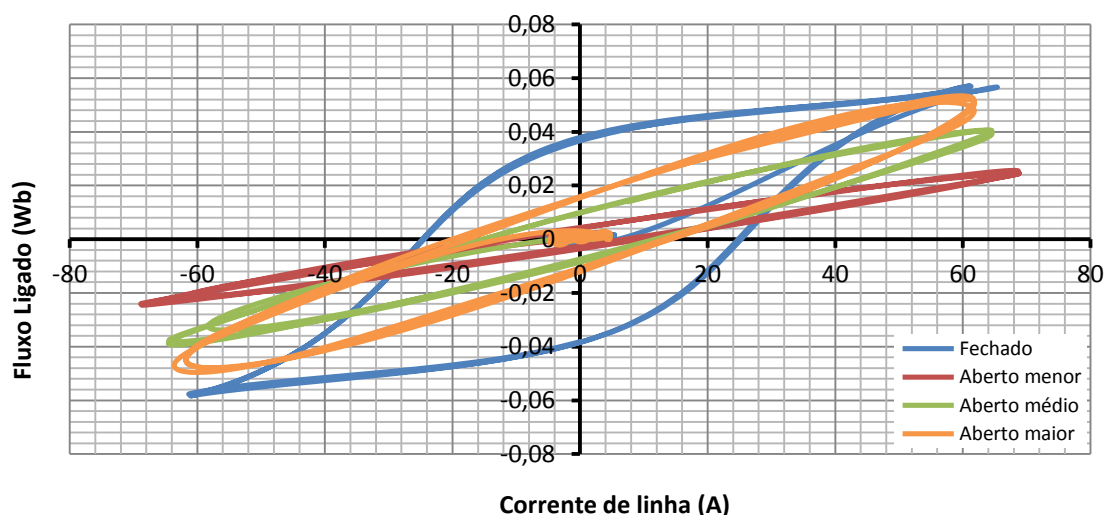


Figura 6.7 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico dos diferentes LCSs durante uma falha, ψ_{LCS} , para uma corrente presumida na ordem dos 102,9 A.

Neste caso os resultados estão de acordo com o esperado, nos quais a limitação vai melhorando progressivamente desde o LCS de núcleo aberto menor até ao de núcleo fechado. Neste último, ignora-se a limitação do primeiro pico, ligeiramente inferior à dos ciclos subsequentes. Ainda assim, já que neste caso o núcleo fechado já se encontra saturado, seria possível melhorar o seu desempenho se o núcleo fosse dimensionado de modo a ficar imediatamente antes da saturação durante a limitação da corrente. A Tabela 6.3 resume as características dos diferentes limitadores neste caso, permitindo assim confirmar as informações retiradas da figura.

Tabela 6.3 – Comparação do desempenhos dos diferentes LCS para uma corrente presumida na ordem dos 102,9 A.

	<i>Limitação (%)</i>	<i>Queda de tensão no LCS (%)</i>
<i>Núcleo aberto menor</i>	33,2 %	0,25 %
<i>Núcleo aberto médio</i>	37,2 %	10,4 %
<i>Núcleo aberto maior</i>	39,9 %	0,89 %
<i>Núcleo Fechado</i>	41,1 %	0,45 %

Os valores da tabela confirmam a coerência ao nível das limitações conseguidas para cada LCS, mostrando também que a queda de tensão em funcionamento normal é na maioria dos casos desprezável face à tensão de alimentação, sendo o caso do núcleo aberto médio justificado com potenciais falhas na instrumentação de aquisição de dados.

6.3.4 Conclusões

Tendo em conta a análise comparativa efectuada ao nível do desempenho dos diferentes limitadores ensaiados, é possível concluir que a melhor limitação de entre todos os limitadores é a do LCS de núcleo fechado, sendo que de entre os de núcleo aberto, a melhor solução é o LCS de maior comprimento. Para todos eles, as quedas de tensão aos seus terminais durante o regime normal de funcionamento são praticamente desprezáveis, pelo que se conclui que o dispositivo mostra-se transparente na linha enquanto não é solicitada a sua acção para limitar uma corrente de falha.

Assim, a questão põe-se essencialmente no uso de limitadores indutivos de núcleo fechado ou aberto. É facto que um LCS de núcleo aberto nunca terá a mesma capacidade de limitação de um com núcleo fechado, contudo essa não é a única característica a considerar.

Os LCS de núcleo aberto apresentam muitas vantagens relativamente aos de núcleo fechado: a sua simplicidade na estrutura, menor peso, menor volume e a facilidade de remoção do elemento SAT em caso de necessidade. Além disso, um aumento do seu comprimento mantém todas estas vantagens e melhora bastante o desempenho do LCS ao nível da limitação, como se comprovou nos resultados experimentais obtidos. Assim, já que é possível obter LCSs de elevado desempenho com núcleos abertos, esta pode ser, na prática, uma solução mais vantajosa e economicamente mais viável para instalações à escala real.

Contudo, nos LCS de núcleo aberto o fluxo magnético não está confinado somente ao ferro, pelo que pode existir campo magnético fora do limitador. Isso pode afectar a operação de equipamentos vizinhos, o que é uma desvantagem. Por outro lado, apesar de nos resultados experimentais o desempenho do LCS fechado não se ter mostrado muito mais eficaz do que a do LCS de núcleo aberto maior, é importante referir que o núcleo não foi dimensionado para as situações dos ensaios efectuados, pelo que se verificava saturação durante a limitação. Isto é algo que não deve acontecer numa situação real, pelo que os resultados de limitação no núcleo fechado poderiam ser bastante melhores com um dimensionamento adequado. Assim, a utilização de núcleos fechados nestes limitadores pode ser a solução ideal para casos mais críticos, onde o volume e peso do equipamento não são problema e onde a limitação de elevadas correntes de falha ou a protecção de dispositivos extremamente frágeis é a grande prioridade.

6.4 Limitação em diferentes instantes de tempo

A fim de se comparar o comportamento dos limitadores quando a sua acção é solicitada em diferentes instantes de tempo, cada ensaio de limitação realizado envolveu a introdução de duas falhas, em diferentes instantes, considere-se t_1 e t_2 . Estas são introduzidas no mesmo ensaio, sem desmagnetizar o núcleo, i.e., a corrente de linha em situação normal é imposta e é feito o primeiro curto-circuito em t_1 , o qual é desfeito pouco depois. A corrente de linha volta então à sua condição normal, quando é então feito o segundo curto-circuito em t_2 . A tensão de alimentação não é alterada em nenhum. Adicionalmente, as falhas são introduzidas manualmente, actuando no disjuntor, pelo que não há qualquer automatismo nem controlo no instante em que este é accionado. O objectivo é perceber se o comportamento do LCS se altera em função do instante em que é activado, nomeadamente do ponto da corrente em que se dá a falha.

No que diz respeito aos núcleos abertos, não há diferenças significativas, uma vez que os ciclos mantêm a mesma forma nos diferentes instantes. Seria repetitivo mostrar os exemplos de todos os ensaios efectuados, pelo que se mostra somente a excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS com núcleo aberto de maior comprimento, em que estão

sobrepostos os resultados dos dois curto-circuitos efectuados em t_1 e t_2 para uma corrente presumida de 102,9 A (Figura 6.8).

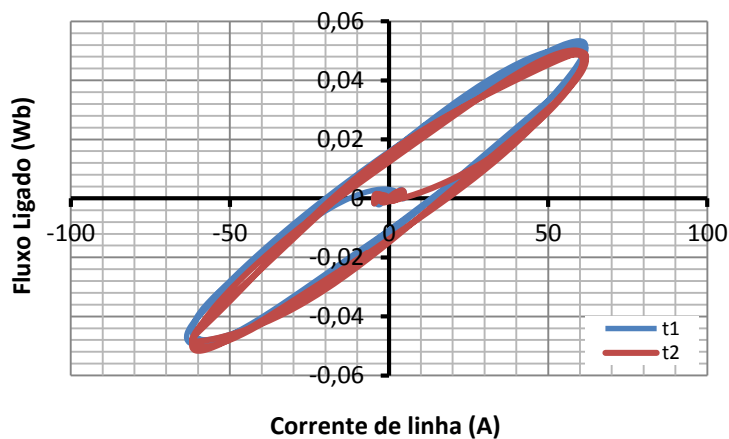


Figura 6.8 – Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha introduzida em dois instantes diferentes, t_1 e t_2 . Caso de núcleo aberto maior e corrente presumida de $i_{Pres} = 102,9$ A.

Os resultados mostram que não existem efectivamente diferenças relevantes, confirmando as conclusões retiradas anteriormente de que o comportamento dinâmico do LCS é descrito em torno de um ciclo de histerese máximo, conforme esperado. É interessante notar que existem dois caminhos distintos que abandonam a zona de fluxo ligado nulo para descreverem um mesmo ciclo de histerese, t_1 pela esquerda e t_2 pela direita, o que mostra que a falha ocorre em diferentes fases do ciclo da corrente de linha mas o comportamento dinâmico é essencialmente o mesmo. As mesmas conclusões podem ser retiradas por análise dos resultados dos outros casos, i.e., para outras correntes presumidas e nos limitadores com os núcleos abertos de comprimento médio e menor.

Considerando agora o caso do LCS de núcleo fechado, o mesmo já não pode ser afirmado, uma vez que é possível distinguir uma ligeira diferença no comportamento dinâmico do LCS perante a falha de um instante para o outro. Este efeito é visível para todos os casos de limitação com núcleo fechado mas é mais flagrante no caso particular de uma corrente presumida de 25,8 A, cuja excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS para os dois instantes é mostrada na Figura 6.9.

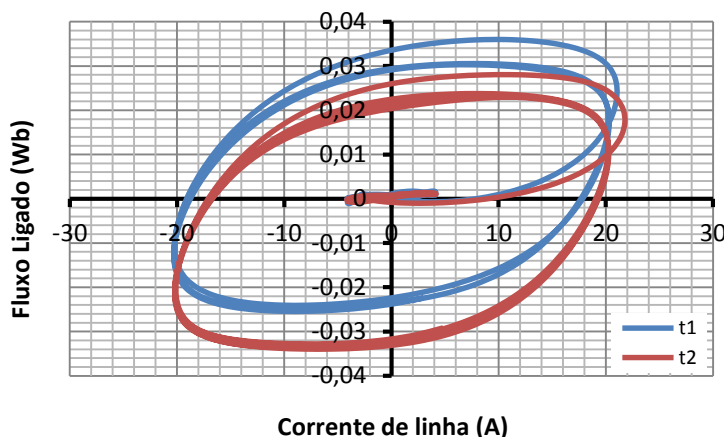


Figura 6.9 - Excursão no plano $i\psi$ do comportamento dinâmico do LCS durante uma falha introduzida em dois instantes diferentes, t_1 e t_2 . Caso de núcleo fechado e corrente presumida de $i_{pres} = 25,8 \text{ A}$.

Como se pode ver, apesar de manter a sua forma, o ciclo descrito durante o período de limitação sofre uma pequena translação de t_1 para t_2 . Contudo, uma vez que os instantes em que é feito o curto-circuito, t_1 e t_2 , não são controlados e que estes pertencem a um mesmo ensaio, sem que ocorra desmagnetização do núcleo, não é possível realizar um estudo mais profundo sobre o tema a fim de encontrar uma explicação para o fenómeno. Remete-se o entendimento deste fenómeno para trabalho futuro, em que devem ser incluídos dispositivos de electrónica de potência para efectuar o controlo no tempo dos curto-circuitos efectuados, nomeadamente através dos seus ângulos de disparo.

6.5 Conclusão

Neste capítulo efectuou-se uma comparação e discussão dos resultados obtidos a vários níveis. O principal objectivo era a validação dos modelos propostos em (Pina, 2010), a qual não foi possível na íntegra, já que os resultados experimentais vieram revelar algumas discrepâncias relativamente aos modelos teóricos, essencialmente no que diz respeito à característica do SAT. Posto isto, concluiu-se que o modelo está em parte correcto, mas que é necessário algumas modificações na modelização do SAT, de modo a convergir os modelos teóricos com os resultados experimentais obtidos. O caminho para estas modificações foi mostrado pelas simulações efectuadas nesta dissertação, cujos resultados se mostram alinhados com o que foi obtido experimentalmente, objectivando a modelização matemática do SAT com base dos resultados experimentais, validando assim por completo a metodologia proposta. Tais considerações são válidas para todos os diferentes LCS ensaiados, i.e., para todos os núcleos.

No que diz respeito à comparação do desempenho dos limitadores entre eles, concluiu-se que o LCS de núcleo fechado é o mais eficaz na limitação, apresentando-se sempre superior

aos de núcleo aberto. Contudo, este não foi adequadamente dimensionado para as condições dos ensaios efectuados, pelo que poderia ainda apresentar melhores resultados. O desempenho dos LCSs de núcleo aberto melhora quando aumentado o comprimento do núcleo, o que permite que sejam construídos LCS de núcleo aberto com capacidades limitadores muito boas. Por esta razão, derivados das suas vantagens topológicas e económicas, eles são frequentemente considerados como as melhores soluções para aplicações práticas à escala real.

Relativamente à limitação em diferentes instantes, concluiu-se que ela introduz ligeiras diferenças somente para o caso do LCS de núcleo fechado. Contudo, como não foi implementada a instrumentação necessária para controlar no tempo os ensaios da limitação, não foi possível tirar conclusões mais profundas acerca deste tema.

As conclusões foram retiradas mais em pormenor na secção dedicada a cada tema, pelo que se apresentou aqui apenas um breve resumo.



7 Conclusões e Trabalho Futuro

Uma vez que as conclusões foram apresentadas em detalhe nas respectivas secções, apresenta-se agora um resumo das mesmas, no sentido de estabelecer a ponte para trabalhos futuros, que inevitavelmente acabam sempre por surgir num trabalho deste género.

O protótipo do limitador foi construído à escala laboratorial, apesar das condicionantes que se fizeram sentir ao nível do material. As bobinas foram enroladas manualmente e existe espaço entre os elementos da coluna central (o ferro, o cilindro SAT e a bobina), factores que contribuem para o aumento da dispersão.

No sentido de validar o modelo proposto teoricamente com resultados experimentais, obtiveram-se a característica do elemento SAT e a característica magnética dos núcleos de ferro, a fim de fazer uma construção experimental do modelo. Conseguiu validar-se algumas das propriedades e atributos do modelo, contudo, algumas diferenças entre os resultados teóricos e experimentais remetem para melhorias a ser feitas nos primeiros. Comprovou-se que o comportamento dinâmico dos LCSs indutivos pode ser modelado com base na característica dos seus elementos constituintes (i.e. do SAT e do núcleo de ferro), apresentando-se sempre na forma de um ciclo de histerese paralelo à característica magnética do primário. No entanto, existiam algumas diferenças entre a característica teórica e experimental do SAT, pelo que é necessário incorporar fenómenos e adaptar as simulações teóricas efectuadas de modo a convergirem com os resultados experimentais. Este caminho foi mostrado e provado ser possível pelas simulações efectuadas já no âmbito desta dissertação, em que se aproximaram as que já haviam sido feitas previamente com os resultados experimentais obtidos. Esta característica está na base de toda a validação do modelo proposto, principal objectivo desta dissertação, remetendo as novas simulações para um novo objectivo, que passa por obter os parâmetros do modelo do SAT com base nos resultados experimentais obtidos, validado assim toda a metodologia.

Para além das considerações acerca da modelização de limitadores deste tipo, os resultados experimentais obtidos nos ensaios de limitação permitiram ainda avaliar o desempenho comparativo das diferentes topologias de núcleo utilizadas. Concluiu-se que um limitador de núcleo fechado apresenta sempre melhor capacidade de limitação. Contudo, a limitação conseguida com LCSs de núcleo aberto não inviabiliza a sua utilização que, dada as suas vantagens a nível construtivo e económico, pode revelar ser a solução ideal para dispositivos à escala real. Concluiu-se ainda que nos LCSs de núcleo aberto, a limitação aumenta com o comprimento do núcleo, dado o aumento na inclinação da característica magnética do núcleo.

Uma vez que os núcleos de ferro usados já estavam disponíveis no laboratório no início deste trabalho, não houve qualquer cuidado no seu dimensionamento tendo em conta as condições de ensaio adoptadas. Assim, uma forma de melhorar as percentagens de limitação conseguidas seria a utilização de núcleos adequados, principalmente no caso do núcleo fechado, onde a saturação já se fazia sentir, ao contrário do que deve acontecer no caso ideal de limitação de uma corrente de falha. O núcleo deve ser dimensionado para que não chegue a atingir a saturação no caso de limitação de uma corrente de curto-circuito de valor nominal.

Apesar de se considerar toda a metodologia e montagem experimental implementada como uma mais valia neste trabalho, é importante referir que existem melhorias de instrumentação a ser feitas, muito provavelmente responsáveis pela correcção de alguns dos resultados obtidos, nomeadamente relativamente às quedas de tensão aos terminais do LCS.

Verificou-se que, principalmente no caso do núcleo fechado, o comportamento dinâmico do limitador apresentava algumas variações em instantes de curto-circuito diferentes. A fim de aprofundar este tema e explicar este efeito, seria necessária a incorporação de um mecanismo de controlo dos curto-circuitos no tempo, recorrendo por exemplo a electrónica de potência. Algo que contribuiria também para o entendimento dos fenómenos associados ao funcionamento do LCS, seria a implementação de uma forma de monitoração constante das grandezas do SAT. As medições efectuadas para a construção da característica do SAT não são feitas numa montagem própria, pelo que não existe conhecimento acerca da variação das grandezas no SAT em condições de curto-circuito. Isto permitiria avaliar as correntes associadas e perceber o fenómeno da transição de estado, o que contribuiria para a formulação do modelo teórico do elemento SAT.

Um factor que não foi considerado em nenhuma parte deste trabalho foi a temperatura, o qual pode ser importante. No futuro, há que incluir os fenómenos térmicos nas simulações e ensaios experimentais, já que isso pode ajudar a perceber os fenómenos de transição de estado, formação de pontos quentes no SAT, *stress* térmico e tempos de recuperação do mesmo após uma falha. No entanto, sendo que é conveniente evitar o aquecimento do

material, a temperatura pode assumir um papel menos importante desde que se garanta que o material não sofre um aquecimento relevante durante a operação do limitador.

Apesar deste tipo de limitadores indutivos com elementos SAT maciços estar praticamente descontinuado, é importante obter formas viáveis e rápidas de modelar o seu comportamento. Mesmo sendo a fita supercondutora o material tendencialmente mais utilizado hoje em dia em novos projectos deste tipo de limitadores, os modelos conseguidos para os cilindros podem ser posteriormente adaptados para a fita, já que esta é instalada no limitador em panquecas sobrepostas que adquirem a forma cilíndrica, mantendo o mesmo princípio de funcionamento. Assim, é importante continuar a aperfeiçoar este método de modelização dos LCSs indutivo baseado nas características do SAT e do primário, pois são estes elementos que ditam o comportamento dinâmico do dispositivo, inclusive o número de espiras do primário, núcleos utilizados, etc. Uma vez atingidos estes objectivos, i.e. criar e validar uma metodologia para modelização e simulação destes dispositivos, o derradeiro objectivo seria a sua aplicação num projecto, construção, ensaio e instalação de um dispositivo deste tipo à escala real.



8 Bibliografia

Arsenio, P., T. Silva, N. Vilhena, J. M. Pina and A. Pronto (2013). "Analysis of Characteristic Hysteresis Loops of Magnetic Shielding Inductive Fault Current Limiters." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 23(3): 5601004-5601004.

Bauml, K. and U. Kaltenborn (2011). Inductive shielded superconducting fault current limiter - a new cost effective solution for industrial network applications. Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE), 2011.

Bean, C. P. (1962). "Magnetization of Hard Superconductors." Physical Review Letters 8(6): 250-253.

Bean, C. P. (1964). "Magnetization of High-Field Superconductors." Reviews of Modern Physics 36(1): 31-39.

Blundell, S. J. (2009). Superconductivity: A Very Short Introduction, OUP Oxford.

Brandt, E. H. (1998). "Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic field. I. Flux penetration and magnetization curves." Physical Review B 58(10): 6506-6522.

Bruyn Ouboter, R. (1987). "Superconductivity: Discoveries during the early years of low temperature research at Leiden 1908-1914." Magnetics, IEEE Transactions on 23(2): 355-370.

Bruyn Ouboter, R. (1997). "Heike Kamerlingh Onnes's Discovery of Superconductivity." Scientific American 276 (3): 98-103.

Buckel, W. and R. Kleiner (2004). Superconductivity: fundamentals and applications, Wiley-VCH.

Cardwell, D. A. and D. S. Ginley (2003). Handbook of Superconducting Materials: Superconductivity, materials and processes, IoP, Institute of Physics.

Charles P. Poole, J., H. A. Farach and R. J. Creswick (2007). Superconductivity, Elsevier Science.

Delft, D. V. (2008). "Little cup of helium, big science." Physics Today: 36-42.

Dommerque, R., S. Krämer, A. Hobl, R. Böhm, M. Bludau, J. Bock, D. Klaus, H. Piereder, A. Wilson, T. Krüger, G. Pfeiffer, K. Pfeiffer and S. Elschner (2010). "First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation." Superconductor Science and Technology 23(3): 034020.

Elschner, S., F. Breuer, H. Walter and J. Bock (2006). "Magnetic field assisted quench propagation as a new concept for resistive current limiting devices." Journal of Physics: Conference Series 43(1): 917-920.

- Elschner, S., F. Breuer, H. Walter, M. Stemmle and J. Bock (2007). "HTS Components for High Voltage Resistive Current Limiters Based on a Magnetic Field Triggered Concept." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 17(2): 1772-1775.
- Elschner, S., F. Breuer, A. Wolf, M. Noe, L. Cowey and J. Bock (2001). "Characterization of BSCCO 2212 bulk material for resistive current limiters." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 11(1): 2507-2510.
- Elschner, S., M. Stemmle, F. Breuer, H. Walter, M. Noe and J. Bock (2008). "Coil in coil components for the high voltage superconducting resistive current limiter cult 110." Journal of Physics: Conference Series 97(1): 012309.
- Feng, L., R. Gou, W. Zhang and X. Yang (2011). Type and characteristic analysis of fault current limiter. Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on.
- Fossheim, K. and A. Sudboe (2004). Superconductivity: Physics and Applications, John Wiley & Sons.
- Gamble, B. B., G. L. Snitchier and R. E. Schwall (1996). "Prospects for HTS applications." Magnetics, IEEE Transactions on 32(4): 2714-2719.
- Ginzburg, V. L. and E. A. Andrůšin (2004). Superconductivity, World Scientific.
- Granados, X., T. Puig, X. Obradors, E. Mendoza, J. Teva, A. Calleja, I. G. Searradilla, M. Segarra, J. Calero, L. García-Tabarés, E. Oyarbide, R. Iturbe and L. Peral (2002). "Design, building up and testing of a 400 kV A hybrid FCL." Physica C: Superconductivity 372–376, Part 3(0): 1680-1683.
- Hassenzahl, W. V., D. W. Hazelton, B. K. Johnson, P. Komarek, M. Noe and C. T. Reis (2004). "Electric power applications of superconductivity." Proceedings of the IEEE 92(10): 1655-1674.
- Hui, H., C. Zhengjian, Z. Jingyin, H. Xiaoming, W. Jianzhong, N. Xiaoye, T. Bo, W. Yang, G. Weizhi and X. Ying (2009). "DC Magnetization System for a 35 kV/90 MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 19(3): 1851-1854.
- Ireson, G. (2012). Discovering Superconductivity: An Investigative Approach, Wiley.
- Janowski, T., S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz and J. Kozak (2003). "Properties comparison of superconducting fault current limiters with closed and open core." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 13(2): 2072-2075.
- Jin Bae, N., K. Young Jae, J. Jae Young, R. Kang Sik, H. Young Jin, C. Sukjin and K. Tae Kuk (2012). "Design and Tests of Prototype Hybrid Superconducting Fault Current Limiter With Fast Switch." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 22(3): 5602604-5602604.
- Jingye, Z., D. Shaotao, Z. Dong, W. Zikai, Z. Fengyuan, S. Naihao, X. Xi, Z. Zhifeng, Z. Zhiqin, G. Zhiyuan, L. Liangzhen and X. Liye (2012). "Construction, Testing and Operation of a 1 MJ HTS Magnet at a 10.5 kV Superconducting Power Substation." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 22(3): 5700504-5700504.
- Kalsi, S. S., B. B. Gamble, G. Snitchler and S. O. Ige (2006). The status of HTS ship propulsion motor developments. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE.
- Kim, Y. B., C. F. Hempstead and A. R. Strnad (1962). "Critical Persistent Currents in Hard Superconductors." Physical Review Letters 9(7): 306-309.
- Kim, Y. B., C. F. Hempstead and A. R. Strnad (1963). "Magnetization and Critical Supercurrents." Physical Review 129(2): 528-535.
- Kozak, J., T. Janowski, S. Kozak, H. Malinowski, G. Wojtasiewicz, B. Kondratowicz-Kucewicz and P. Surdacki (2004). "The influence of superconducting fault current limiter structure on the V-I characteristic." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 14(2): 811-814.
- Kozak, S., T. Janowski, G. Wojtasiewicz, J. Kozak and B. A. Glowacki (2006). "Experimental and Numerical Analysis of Electrothermal and Mechanical Phenomena in HTS Tube of Inductive SFCL." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 16(2): 711-714.

- Kreutz, R., J. Bock, F. Breuer, K. P. Juengst, M. Kleimaier, H. U. Klein, D. Krischel, M. Noe, R. Steingass and K. H. Weck (2005). "System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 15(2): 1961-1964.
- Lee, B. W., K. B. Park, J. Sim, I. S. Oh, H. G. Lee, H. R. Kim and O. B. Hyun (2008). "Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 18(2): 624-627.
- Lee, P. J. (2002). "Superconductor: Wires and Cables: Materials and Processes." The Applied Superconductivity Center.
- Leung, E. (1997). "Surge protection for power grids." Spectrum, IEEE 34(7): 26-30.
- Li, L. F., L. H. Gong, X. D. Xu, J. Z. Lu, Z. Fang and H. X. Zhang (2007). "Field Test and Demonstrated Operation of 10.5 kV/1.5 kA HTS Fault Current Limiter." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 17(2): 2055-2058.
- Maguire, J. F., F. Schmidt, S. Bratt, T. E. Welsh and Y. Jie (2009). "Installation and Testing Results of Long Island Transmission Level HTS Cable." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 19(3): 1692-1697.
- Min Cheol, A. and K. Tae Kuk (2011). "Proof-of-Concept of a Smart Fault Current Controller With a Superconducting Coil for the Smart Grid." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 21(3): 2201-2204.
- Montgomery, D. B. (1997). "The future prospects for large scale applications of superconductivity." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 7(2): 134-145.
- Motora, S., S. Takezawa and H. Tamama (1991). Development Of The Mhd Ship Yamato-1. OCEANS '91. Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's. Proceedings.
- Neumann, C. (2006). Superconducting fault current limiter (SFCL) in the medium and high voltage grid. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE.
- Noe, M. and B. R. Oswald (1999). "Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 9(2): 1347-1350.
- Noe, M. and M. Steurer (2007). "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status." Superconductor Science and Technology 20(3): R15-R29.
- Paul, W., T. Baumann, J. Rhyner and F. Platter (1995). "Tests of 100 kW High-T_c superconducting fault current limiter." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 5(2): 1059-1062.
- Paul, W. and M. Chen (1998). "Superconducting control for surge currents." Spectrum, IEEE 35(5): 49-54.
- Paul, W., M. Lakner, J. Rhyner, P. Unternährer, B. Th, M. Chen, L. Widenhorn and A. Guérig (1997). "Test of 1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter." Superconductor Science and Technology 10(12): 914.
- Pina, J., M. Neves, A. Álvarez and A. Rodrigues (2010). High Temperature Superconducting Fault Current Limiters as Enabling Technology in Electrical Grids with Increased Distributed Generation Penetration. Emerging Trends in Technological Innovation. L. Camarinha-Matos, P. Pereira and L. Ribeiro, Springer Berlin Heidelberg. 314: 427-434.
- Pina, J. M., P. Pereira, A. Pronto, P. Arsénio and T. Silva (2012). "Modelling and Simulation of Inductive Fault Current Limiters." Physics Procedia 36(0): 1248-1253.
- Pina, J. M. M. (2010). Desenho e modelização de sistemas de energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL.

- Pleva, E. F. and S. W. Schwenterly (2004). Assembly and test of 5/10 MVA HTS transformer. Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE.
- Raju, B. P., K. C. Parton and T. C. Bartram (1982). "A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects." Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on PAS-101(9): 3173-3177.
- Satoh, T., M. Yamaguchi, S. Fukui, K. Morikoshi, K. Kaiho, T. Matsumura, H. Shimizu and N. Murayama (2001). "Three-phase fault current limiter with one DC S/N transition element." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 11(1): 2398-2401.
- Sawada, K. (1996). "Development of magnetically levitated high speed transport system in Japan." Magnetics, IEEE Transactions on 32(4): 2230-2235.
- Schmitt, H. (2006). Fault current limiters report on the activities of CIGRE WG A3.16. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE.
- Shimizu, H., Y. Yokomizu and T. Matsumura (2004). "Comparison of fundamental performance of different type of fault current limiters with two air core coils." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 14(2): 807-810.
- Song-Ho, S., Y. Hyung-Suk, L. Ji-Hyun, O. Seung-Ryle, Y. Seong-Woo, L. Su-Kil, J. Hyun-Man and H. Si-Dole (2012). "Installation and Power Grid Demonstration of a 22.9 kV, 50 MVA, High Temperature Superconducting Cable for KEPCO." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 22(3): 5800804-5800804.
- Stavrev, S., F. Grilli, B. Dutoit, N. Nibbio, E. Vinot, I. Klutsch, G. Meunier, P. Tixador, Y. Yifeng and E. Martinez (2002). "Comparison of numerical methods for modeling of superconductors." Magnetics, IEEE Transactions on 38(2): 849-852.
- Sung-Hun, L., Y. Il-Kyoung and K. Jae-Chul (2011). "Study on Peak Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using Its Third Winding." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 21(3): 1275-1279.
- Tixador, P., D. Buzon, E. Floch, L. Porcar, D. Isfort, X. Chaud, R. Tournier, D. Bourgault, J. M. Barbut and J. Bach (2002). "Superconducting fault current limiter with bulk materials." Physica C: Superconductivity 378-381, Part 1(0): 815-822.
- Tsukamoto, O. (2005). "Roads for HTS power applications to go into the real world: Cost issues and technical issues." Cryogenics 45(1): 3-10.
- Wanmin, F. and W. Bin (2009). A novel topology of bridge-type superconducting fault current limiter. Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09. Canadian Conference on.
- Ward, D. A. and J. L. T. Exon (1993). "Using Rogowski coils for transient current measurements." Engineering Science and Education Journal 2(3): 105-113.
- Weber, C. S., C. T. Reis, D. W. Hazelton, S. W. Schwenterly, M. J. Cole, J. A. Demko, E. F. Pleva, S. Mehta, T. Golner and N. Aversa (2005). "Design and operational testing of a 5/10-MVA HTS utility power transformer." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 15(2): 2210-2213.
- Xin, Y., H. Hong, J. Z. Wang, W. Z. Gong, J. Y. Zhang, A. L. Ren, M. R. Zi, Z. Q. Xiong, D. J. Si and F. Ye (2011). "Performance of the 35 kV/90 MVA SFCL in Live-Grid Fault Current Limiting Tests." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 21(3): 1294-1297.
- Yin, X., W. Z. Gong, X. Y. Niu, Y. Q. Gao, Q. Q. Guo, L. X. Xiao, Z. J. Cao, H. Hong, A. G. Wu, Z. H. Li, X. M. Hu, B. Tian, J. Y. Zhang, Y. He, Y. Wang, J. Cui, S. Z. Ding, J. Z. Wang, A. L. Ren and F. Ye (2009). "Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 19(3): 1934-1937.
- Zong, X. H., J. X. Wang, J. Sun and Y. N. Wang (2003). "Study on inductive high-T_c superconducting fault current limiters." Physica C: Superconductivity 386(0): 522-526.